



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

CLASSE INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
(DM 509/99)

SVILUPPO DEI DISPOSITIVI A STATO SOLIDO

Relatore: Dott. Massimo Guarnieri

Laureando: ALBERTO PASINATO

26 Aprile 2010

ANNO ACCADEMICO 2009-2010

Sommario

Nelle seguenti pagine si è cercato di spiegare l'evoluzione e lo sviluppo dei dispositivi a stato solido in un linguaggio narrativo, in modo che il lettore possa, come ci si augura, provare quel senso di organica crescita naturale che caratterizza, per chi scrive, la scienza quanto l'arte.

Per una maggiore chiarezza e leggibilità, l'attenzione è stata concentrata sui personaggi più importanti e sulle questioni principali, e in generale ci si è limitati a trattare quelle intuizioni e scoperte che, negli anni, hanno cambiato il volto dell'elettronica dello stato solido.

Il tema centrale è il processo che ha portato alla realizzazione del primo dispositivo con effetto transistor, ed il suo sviluppo in termini di prestazioni, dimensioni, consumo e costi realizzativi negli anni a seguire, concetti che difficilmente possono essere trattati separatamente. Una particolare attenzione è stata data anche ai semiconduttori, i quali hanno avuto naturalmente un ruolo chiave, soprattutto dopo l'invenzione del dispositivo MOSFET.

I riferimenti ad eventi e protagonisti dell'evoluzione del "transfer resistor" arrivano fino all'integrazione su larga scala, a cavallo degli anni settanta, questo non perché si ritenga che negli anni successivi sia cessato lo studio o decaduto l'interesse per l'elettronica dello stato solido, bensì perché il particolare sviluppo che si intendeva trattare era in qualche modo giunto a conclusione, in modo particolare se si considera la metrica storica che l'impostazione complessiva di questo elaborato richiedeva. In quegli anni, viste anche le prospettive che i solid-state devices potevano avere (Legge di Moore), l'elettronica dello stato solido era già una realtà che attendeva di migliorarsi.

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1 - I principali protagonisti	3
1.1 Karl Ferdinand Braun	3
1.2 Julius Edgar Lilienfeld	5
1.3 John Bardeen	7
1.4 Walter Houser Brattain	10
1.5 William Bradford Shockley	13
Capitolo 2 - Il ruolo del silicio	21
2.1 I semiconduttori	21
2.1.1 Struttura	21
2.2 Il silicio	23
2.2.1 Perché il silicio	23
2.2.2 Da Berzelius alla Valle del Silicio	24
2.3 Produzione	25
2.4 Purificazione	26
2.4.1 Fusione a zona	26
2.4.2 Metodo Czochralski	27
Capitolo 3 - I primi dispositivi a stato solido	29
3.1 L'inizio di una grande metamorfosi	29
3.2 Cat's-whisker detector	31
3.2.1 Il dispositivo	31
3.2.2 Galena e non solo	32
3.2.3 Le prime applicazioni commerciali	33
3.3 La distrazione del vuoto	35
3.3.1 La predizione di Lilienfeld	37
Capitolo 4 - Il Transistor	41
4.1 Dispositivi a stato solido, una strada obbligata	41
4.1.1 Storia del transfer resistor	42
4.1.2 La scoperta della giunzione p-n	43
4.1.3 L'invenzione del transistor a contatto puntiforme	44
4.2 L'alternativa di Shockley	46
4.2.1 Il Bipolar Junction Transistor	47
4.3 Tra bipolare ed unipolare	50
4.3.1 I problemi di produzione	51
4.3.2 La ricerca del silicio	53
Capitolo 5 - Il MOS: una nuova era	57
5.1 L'evoluzione dei FET	57
5.1.1 Gli esperimenti	58
5.2 Dal JFET al MOSFET	59
5.3 Il transistor planare	63
5.4 Il circuito integrato	64
5.5 L'integrazione su larga scala	66
5.5.1 Un po' di made in Italy	67
5.5.2 La legge di Moore	69
Bibliografia	73

Introduzione

La nascita dell'elettronica (questo termine si è diffuso a partire dagli anni Trenta del secolo scorso) viene datata con la scoperta dell'elettrone (1897) e con l'invenzione di vari dispositivi basati sul moto di cariche elettriche nel vuoto, come il tubo a raggi catodici, il diodo, il triodo e gli altri tubi elettronici che furono introdotti nei primi decenni del Novecento.

In passato l'elettronica si configurava come la scienza e la tecnica dei dispositivi elettronici propriamente detti, che trovavano impiego, soprattutto, nella trasmissione di informazioni, con la radio e la telefonia a grande distanza. Inoltre, poiché le intensità di corrente usate in questi dispositivi erano generalmente assai inferiori a quelle impiegate nelle altre, e più antiche, applicazioni dell'elettricità, l'elettronica era intesa come tecnica delle "correnti deboli" per distinguerla dalla tecnica delle "correnti forti" o elettrotecnica, che riguardava invece le applicazioni in cui l'energia ha un ruolo essenziale (macchine e impianti per la produzione, la trasmissione a distanza e l'utilizzazione pratica dell'energia elettrica). Nel medesimo quadro si collocava, dopo l'invenzione nel 1947 del transistor, la diffusione di una estesa varietà di nuovi dispositivi, che differivano da quelli precedenti perché il moto delle cariche aveva luogo in corpi solidi, anziché nel vuoto (o in un gas), e il loro impiego in una molteplicità di applicazioni.

Tuttavia le prime scoperte, e le prime applicazioni, dei dispositivi a stato solido hanno preceduto quelle dell'elettronica dei dispositivi a vuoto. La scoperta, per esempio, dell'effetto Hall era avvenuta già nel 1880. I primi "diodi" (i raddrizzatori a baffo di gatto "cat's whisker", basati sulle proprietà del contatto metallo-semiconduttore) erano stati costruiti da Karl Ferdinand Braun nel 1874 e furono usati largamente ai primordi della radio. Ma a quel tempo non si disponeva ancora delle basi teoriche di fisica dei solidi e questo impedì ulteriori progressi. Tuttavia, vari tipi di raddrizzatori a stato solido (realizzati ad esempio con selenio o ossido di rame) furono sviluppati su basi empiriche e usati comunemente fino a pochi decenni addietro.

Componenti elettronici, dispositivi e sistemi a stato solido sono interamente basati su semiconduttori. Ad oggi sono transistor, microprocessori e memorie. In questi dispositivi non c'è più una dipendenza dalle proprietà elettriche del vuoto, nessuna azione meccanica e nessuna parte in movimento, nonostante si svolga una considerevole azione elettromagnetica.

Infatti nei componenti a stato solido, la corrente è confinata in un elemento solido composto e progettato specificatamente proprio per farla passare e amplificarla.

L'odissea dei semiconduttori ha prodotto una rivoluzione nella nostra società profonda almeno quanto l'introduzione dell'acciaio, delle macchine a vapore, e l'intera rivoluzione industriale. L'elettronica oggi pervade le nostre vite e riguarda tutto ciò che facciamo, sia al lavoro che a casa. Prima dell'invenzione del transistor, si avevano due dispositivi per eseguire la logica e le funzioni di amplificazione di cui avevamo bisogno. Il primo era il relè, nel quale veniva utilizzato un elettromagnete per spostare un pezzo di metallo su un filo in contatto con un altro pezzo di metallo. Una piccola quantità di potenza nel circuito magnetico era in grado di controllare una maggiore quantità di potenza nel circuito di contatto. Il dispositivo era semplice, robusto e molto affidabile, un interruttore eccellente. La limitazione era che i relè si muovevano ad una velocità “meccanica”, il che richiedeva circa un millisecondo per aprire o chiudere il contatto. Era un milione di volte più lento rispetto al suo concorrente, il tubo a vuoto, in cui avveniva un rilascio di elettroni. Gli elettroni erano emessi da un filamento caldo all'interno di un bulbo di vetro e venivano raccolti da una piastra caricata positivamente. Il flusso di elettroni che usciva dal filamento era controllato da una piccola tensione su un elettrodo. Il tubo a vuoto poteva funzionare da interruttore e da amplificare, e dato che gli elettroni potevano viaggiare alla velocità del vuoto, erano molto più veloci dei relè. Ma questo dispositivo utilizzava un notevole tempo di attesa, e la sua vita era limitata. Il filamento si bruciava oppure il bulbo iniziava a perdere. Così, il tubo a vuoto andava bene solo per applicazioni in cui ne venivano utilizzati pochi, come succedeva, ad esempio, nelle radio. Dove invece il bisogno cresceva enormemente, come nei computer, non poteva più essere adatto.

Un dispositivo a stato solido prometteva il migliore dei mondi: gli elettroni viaggiano per brevi distanze in un solido, non si spostano parti meccanicamente, nessuna filamenti caldo, e niente vuoto. Doveva quindi essere veloce, economico e affidabile. L'invenzione del transistor consegnava all'umanità un tale dispositivo. Alla fine, ha mantenuto la promessa, facendo anche molto altro. Ma ci sono voluti molti anni e un sacco di duro lavoro per convertire un'invenzione emozionante nell'innovazione rivoluzionaria che ha cambiato le nostre vite in maniera profonda.

Capitolo 1 - I principali protagonisti

Molti sono i personaggi, principalmente fisici e chimici, che sono stati protagonisti, apportando chi più chi meno, un utile contributo allo sviluppo dei dispositivi a stato solido. Pochi tuttavia rimangono nella storia per essere stati i precursori, come Braun e Lilienfeld, che decenni prima della nascita del transistor ne descrivevano un primitivo archetipo, oppure gli innovatori, come Brattain, Bardeen e Shockley, che nel dicembre del 1947 cambiarono il volto dell'elettronica.

1.1 Karl Ferdinand Braun

Fulda 1950 – Brooklyn 1918, fisico tedesco



Figura 1.1: K. Ferdinand
Braun

Sin da giovane si dimostrò uno studente modello ed altrettanto velocemente emerse il suo enorme talento ed interesse per la scienza, infatti, ancor prima di finire il liceo, aveva già firmato diversi lavori scientifici che vennero pubblicati su diversi giornali. Iniziò la sua carriera universitaria, con l'intento di diventare un professore di scienze, presso l'Università di Marburg. Tuttavia cambiò velocemente idea, ed università. Si trasferì all'Università di Berlino, dove si laureò in fisica. A 24 anni, presso l'Università di Wurzburg, iniziò a lavorare come assistente al professor Quincke, ed allo stesso tempo, come desiderava, intraprese la carriera di professore universitario. Ma la ricerca rimaneva la sua passione. Concentrò le sue attenzioni su elettroliti e cristalli che conducevano elettricità. Proprio i suoi interessi nella conduttività elettrica di soluzioni saline di metalli (elettroliti) lo portarono verso i cristalli di solfuro di metalli (*metal sulfide crystals*) e altri solidi cristallini che conducevano anche se non dissolti. Dopo molti esperimenti, Braun fece una relazione nel 1874 dove riportava che per molti *metal sulfides* la resistenza elettrica variava con il modulo e la polarità della tensione applicata. Descriveva quindi una deviazione della legge di Ohm.

Quando iniziò a testare un cristallo di galena (un materiale semiconduttore composto di solfuro di piombo) con la punta di un sottile cavo metallico, Braun notò che la corrente fluiva liberamente in un'unica direzione. Scoprì così le proprietà rettificatrici nel contatto

puntiforme tra un metallo e un certo materiale cristallino (*point-contact rectifier effect*). In altre parole Ferdinand Braun creò il primo dispositivo a semiconduttore, in cui la punta del filo metallico fungeva da elettrodo puntiforme, il tutto prima della scoperta dell'elettrone: il rivelatore di onde elettromagnetiche a baffo di gatto *Cat's Whisker*. L'utilizzo di questo nome comune per descrivere il dispositivo è dovuto proprio alla sottile sonda metallica utilizzata per creare un contatto elettrico con la superficie del cristallo. Dopo ulteriori prove ed esperimenti, lo mostrò al pubblico a Leipzig il 14 novembre 1876, ma non riuscì a trovare utili applicazioni prima dell'avvento della radio, ai primi del 1900, quando fu riscoperto e utilizzato nella forma di *signal detector in a crystal radio set*, come *Cat's Wisker detector*. Tale dispositivo, ben oltre la morte di Braun (1918), darà un valido contributo nella produzione del primo *point-contact transistor*, 1948.

Fu lo stesso Braun ad accantonare la sua scoperta. Il raddrizzatore *Cat's Wisker*, per la sua configurazione, era un dispositivo instabile, ed allora spostò la sua attenzione verso lo studio di alcuni aspetti dell'elettricità. Passarono più di venti anni durante i quali sviluppò diversi strumenti per misure elettriche, fino ad arrivare al 1897, all'invenzione del tubo indicatore a raggi catodici, (*Braun Cathode Ray Indicator Tube*), dove il flusso elettronico subiva una deviazione unidirezionale (verticale), proporzionale alla grandezza da misurare. Era l'archetipo dell'oscilloscopio. Quindi i suoi lavori si spinsero verso dispositivi che sfruttavano le proprietà elettriche del vuoto ed utilizzavano parti meccaniche.

Ci fu una sorta di svolta quando Braun venne assunto da Ludwig Stollwerck, un imprenditore di successo di Colonia, per spiegare i principi tecnici dietro al sistema di funzionamento per la *telegrafia wireless underwater*, sviluppata da tre uomini dalle non eccellenti basi scientifiche: Lodge, Slaby, Marconi. In particolare Braun studiò il lavoro di Marconi, interessato a determinare perché quest'ultimo incontrò difficoltà ad aumentare la distanza sulla quale era possibile una trasmissione, oltre i 15km. L'intuizione di Braun fu quella di connettere l'antenna al circuito trasmittente tramite un mutuo induttore, che garantiva efficienza di trasmissione e selettività decisamente migliori rispetto al sistema sviluppato da Marconi. Brevettò il suo sistema nel 1899. Stollwerck, il suo finanziatore, volle creare una corporazione per sviluppare e poi vendere il dispositivo per applicazioni commerciali e militari. Venne così creata una nuova compagnia, della quale Braun fu un associato, la Telefunken. In breve tempo riuscì a trasmettere oltre i 60km (1901). Fu allora, nel tentativo di

migliorare il ricevitore del sistema di telegrafo wireless, che riprese in considerazione il suo raddrizzatore ai cristalli di galena, riscoprendolo. Furono altri in seguito a migliorarlo ed, inizialmente, ad utilizzarlo come ricevitore nel campo radiotelefonico. Il nuovo e revisionato sistema fu commercializzato in Germania dalla società Braun-Siemens.

I suoi studi ed il suo lavoro proprio sui telegrafi wireless, vennero ufficialmente riconosciuti con l'assegnazione, insieme a Marconi, del premio Nobel per la fisica nel 1909.

Poco dopo l'inizio della Prima Guerra Mondiale, Braun fu chiamato negli Stati Uniti per testimoniare in un processo in merito ad un brevetto. Gli sviluppi della guerra e l'inaspettata malattia lo portarono a rimanere a Brooklyn, presso l'abitazione del figlio, dove morì nel 1918.

1.2 Julius Edgar Lilienfeld

Lviv 1882 – Charlotte Amalie 1963, fisico tedesco naturalizzato statunitense



Figura 1.2: J. Edgar
Lilienfeld

Nato il 18 Aprile del 1882 a Lviv, oggi Ucraina, allora parte dell'Impero Austro-Ungarico, finiti gli studi secondari, si spostò a Berlino per conseguire una laurea in ingegneria meccanica. Tuttavia, dopo il primo anno di studi, cambiò idea e decise di dedicarsi al suo più grande interesse, le scienze naturali, e nel 1900 lasciò il Politecnico. Nel novembre dello stesso anno si iscrisse allora alla Friedrich Wilhelms Universitat, sempre a Berlino. Le sue materie preferite erano fisica e chimica, tanto che nel 1904, già prima di terminare gli studi, iniziò a lavorare presso l'Istituto di Fisica, sotto la guida di Emil Warburg. L'anno

successivo si spostò all'Istituto di Fisica dell'Università di Leipzig, collaborando con Otto Wiener. Gli studi di Lilienfeld in quegli anni erano concentrati sulla produzione di aria liquida e successivamente idrogeno liquido, grazie ad un lavoro con alta pressione e bassa temperatura (criogenesi). Proprio in quegli anni lavorò con Count Ferdinand von Zeppelin per la realizzazione di dirigibili riempiti ad idrogeno.

Allo stesso tempo le sue attenzioni si concentrarono su un argomento collegato, ovvero la conducibilità elettrica in tubi a vuoto (*highly evacuated tube*), tema del suo post-dottorato per

ottenere l'abilitazione all'insegnamento.

Con la guerra, per sottrarsi alle crescenti pressioni razziali, essendo ebreo, nel 1920 andò negli Stati Uniti, dove, poco dopo il suo arrivo, brevettò un tubo a raggi X (*X-ray tube*), studiando e lavorando sulle teorie di Sommerfeld e Bohr. Da queste ricerche, Lilienfeld ottenne diversi brevetti su dispositivi ad emissione di campo, ma che, a quel tempo, non avevano nessuna applicazione tecnica. Tra questi uno dei più importanti furono l'*Autoelectronic Device*, descritto dallo stesso Lilienfeld come un “dispositivo che liberava elettroni, incorporando un effetto autoelettronico”, ossia, un rilascio di elettroni dovuto alla presenza di un campo elettrico (*US patent 1922*) e un Apparato Rettificante per Corrente Alternata (*US patent 1926*). Quest'ultimo brevetto venne dopo il lavoro ispirato dal lungo elaborato sulle scariche di un elettrone (*cold and hot electron discharges*) firmato da Walter Schottky, in cui faceva riferimento ai contatti rettificanti (*rectifying contacts*). L'apparato descritto dal brevetto si presentava semplice, ma l'uso di elementi solidi di fatto apriva una nuova strada: quella dei dispositivi a stato solido.

Allo stesso modo con cui arrivò all'idea di dispositivi ad emissione di campo, iniziò a pensare a qualcosa di più radicale, focalizzando l'attenzione sulla modulazione di conducibilità di un solido attraverso un campo trasverso.

Ottenne altri tre brevetti, che descrivevano la struttura che oggi possiamo identificare come *FET* (*Field-Effect Transistor*): il primo (*US patent 1745175*, del 1925, Metodo ed apparato per il controllo di correnti elettriche) conduce al *MESFET* (*MEtal/Semiconductor FET*), il secondo (*US patent 1900018*, del 1928, Dispositivo per il controllo della corrente elettrica), derivate dal primo, conduce al *MOSFET* (*Metal-Oxide/Semiconductor FET*). Il terzo descriveva altre due strutture a transistor, di cui una era l'*SMST* (*Semiconductor/Metal/Semiconductor Transistor*), dispositivo a semiconduttore in grado di amplificare un segnale (*US patent 1877140*, del 1928, Amplificatore per correnti elettriche). Di fatto era la prima versione del moderno MOSFET.

Nessuno sa esattamente se Lilienfeld riuscì a realizzare il suo dispositivo, e nel caso l'avesse realizzato, probabilmente il dispositivo non avrebbe lavorato bene, almeno fino a quando non sarebbero stati prodotti dei materiali semiconduttori di qualità, cioè decenni addietro.

Il risultato fu che i suoi brevetti passarono quasi inosservati e non ebbero sviluppi commerciali, sia per problemi tecnici, causa l'indisponibilità di semiconduttori

sufficientemente puri, sia economici, con l'aggravarsi delle condizioni macroeconomiche (la Grande Depressione del 1929).

La parola transistor comparirà solo a partire dal 1946, dopo lo sviluppo di un dispositivo amplificatore a stato-solido, nei Laboratori Bell (*Bell Telephone Laboratories*), in cui venne utilizzato germanio purissimo. Dovettero passare altri vent'anni circa per dare un senso ai brevetti sull'effetto campo.

Contemporaneamente a questi lavori, Lilienfeld registrò diversi brevetti sempre in campo elettrotecnico, ma anche in quello chimico. Infatti, nel 1928, assunto come ricercatore e sviluppatore alla Amrad Corporation, nel Massachusetts, cominciò un lavoro sull'elettrochimica dei film di ossido di alluminio, considerando le applicazioni che questi potevano avere nella costruzione di condensatori elettrolitici, componenti molto diffusi in molti dispositivi elettronici.

Ormai stabilmente negli Stati Uniti, nel 1926 sposò una donna americana e ottenne la cittadinanza nel 1934. Un anno dopo, col peggiorare della sua allergia alle graminacee, si trasferì a St. Thomas nelle Isole Vergini, ma nonostante ciò, i suoi esperimenti continuarono, ed iniziò pure una fitta corrispondenza con Albert Einstein. Saltuariamente faceva dei viaggi in città che gli consentivano di continuare a testare nuove idee e brevettare i risultati ottenuti, ma la sua casa ormai era alle Isole Vergini, dove morì nel 1963.

1.3 John Bardeen

Madison 1908 – Boston 1991, ingegnere elettrico e fisico statunitense



Figura 1.3: John Bardeen

John Bardeen, nato il 23 maggio 1908 a Madison, nel Wisconsin, era il secondo figlio del Dott. Charles Russell Bardeen, decano dell'università di scuola medica del Wisconsin ed Althea Harmer Bardeen, una giovane donna istruita che aveva studiato l'arte ed il disegno all'istituto Pratt di Brooklyn. Bardeen era un bambino brillante e i suoi genitori decisero di fargli proseguire gli studi.

Quando Bardeen fu dodicenne, sua madre si ammalò seriamente di cancro. Il Dott. Bardeen non realizzò la gravità della sua malattia, con la donna stava morendo, e John rimase sconvolto quando ciò

accadde. Suo padre sposò rapidamente la sua segretaria, Ruth Hames, desideroso di dare ai suoi bambini ancora in giovane età una famiglia. Ma ciò non aiutò molto John che era affranto e distratto. Tuttavia superò l'*high school* e si iscrisse all'università del Wisconsin nell'autunno del 1923 all'età di 15 anni, dove si diplomò in ingegneria. Scelse ingegneria perché amava la matematica, anche se aveva avuto buoni prospettive di lavoro. Non desiderava essere un accademico, come suo padre. Al momento in cui si diplomò, tuttavia, il mondo era in piena depressione e c'era carenza di lavoro. Bardeen fu corteggiato brevemente dai Laboratori Bell, ma una scadente proposta di assunzione chiuse quella porta.

Una delle poche aziende che ancora assumevano era la Gulf Oil Company e Bardeen prese a lavorare lì come geofisico. Rimase là per tre anni, anche se teneva sempre un occhio sul progresso della fisica nel mondo. Il suo cuore non era per la geologia, e venne il tempo di tornare a scuola. Bardeen andò a Princeton, nell'Illinois, per ottenere il suo *Ph.D.* in fisica matematica. Fu là che Bardeen per la prima volta avviò studi sui metalli. A Princeton visse momenti stimolanti. In quel periodo scienziati come Eugene Wigner e Frederick Seitz stavano usando le nuove teorie sui quanti, che contribuivano a capire come funzionavano i semiconduttori. Queste teorie avrebbero aiutato successivamente Bardeen durante l'invenzione del transistor. Finì la sua dissertazione nel 1935.

Bardeen fu impiegato ad Harvard come docente junior con uno stipendio di 1500\$ l'anno, più le spese per vivere, una somma considerata notevole allora. La vita a Cambridge, nel Massachusetts, gli permise di passare più tempo con la sua fidanzata Jane Maxwell, una biologa che insegnava ad una *high school* femminile vicino a Boston. Si sposarono nel 1938. Dopo Harvard, Bardeen lavorò all'università del Minnesota fino a quando non scoppiò la II Guerra Mondiale. Allora si trasferì ai Naval Ordnance Labs (laboratori navali di artiglieria). Durante la guerra, aiutò la Marina a sviluppare le protezioni per navi e sommergibili della U.S. Navy da mine magnetiche e dai siluri nemici.

John Bardeen incontrò William Shockley quando stavano entrambi studiando in Massachusetts. Nel 1945, quando la II Guerra Mondiale si concluse, Shockley fu incaricato di dirigere un nuovo gruppo di ricerca ai Laboratori Bell e desiderò Bardeen nella squadra. Poiché la Bell offrì a Bardeen uno stipendio pari a due volte quello che percepiva nel Minnesota, Bardeen non dovette pensare a lungo all'offerta, ed accettò. John e Jane Bardeen,

con i loro tre bambini in giovane età, si spostarono in New Jersey.

Bardeen inoltre conosceva un altro membro del gruppo, Walter Brattain, dai giorni degli studi di ingegneria elettrica. Bardeen fu introdotto a Walter Brattain dal suo buon amico Bob, fratello di Walter. Nel corso degli anni la loro amicizia si sviluppò, sia in laboratorio che sul campo da golf dove passavano il tempo nei fine settimana. I due formavano una grande squadra, con Brattain che realizzava gli esperimenti e Bardeen che sviluppava le teorie per spiegarne i risultati.

Nella primavera del 1947, Shockley diede a Brattain e a Bardeen il compito di spiegare perché un amplificatore, che egli aveva inventato, non funzionava. Al cuore di questo amplificatore c'era un cristallo di silicio (che sarebbe stato sostituito con germanio parecchi mesi più tardi). Per spiegare cosa stava accadendo, Bardeen dovette ricordarsi di alcune ricerche di meccanica quantistica che erano state fatte sui semiconduttori quando era a Princeton negli anni '30. Inoltre fornì alcune sue nuove teorie. Osservando gli esperimenti di Brattain, Bardeen si rese conto che era errato assumere che la corrente elettrica attraversasse tutte le parti del germanio allo stesso modo: gli elettroni si comportavano diversamente alla superficie del metallo. Se Brattain e Bardeen avessero potuto controllare cosa stava accadendo sulla superficie, l'amplificatore avrebbe potuto funzionare. Questa ricerca li impegnò fino alla fine del 1947, ma il 23 dicembre l'accoppiamento era riuscito e i risultati degli esperimenti svolti vennero comunicati alla direzione dei laboratori. Questa data è universalmente considerata come data di nascita del transistor. Avevano costruito il primo transistor con contatti a punte metalliche (*point-contact transistor*). Il dispositivo era formato da un cristallo di germanio drogato n (base) e da due contatti d'oro molto vicini (emettitore e collettore).

Dopo l'invenzione del transistor, l'umore in laboratorio calò. Shockley si era risentito del fatto che aveva mancato l'invenzione. Cominciò a lavorare per conto proprio, sviluppando e migliorando il transistor verso il più stabile transistor a giunzione o a sandwich. I rapporti peggiorarono completamente quando Shockley impedì a Bardeen di lavorare alle cose che lo interessavano. Dal 1951 Bardeen cominciò a cercare un nuovo lavoro. L'università dell'Illinois lusingò John Bardeen con quella cosa che desiderava di più: il diritto a ricercare qualunque cosa desiderasse. Bardeen decise di lavorare sulla superconduttività, che aveva cominciato ad interessarlo nei suoi ultimi giorni ai Laboratori Bell.

La mattina di giovedì 1 novembre 1956, John Bardeen stava facendo la prima colazione e stava ascoltando la radio. Sentì un annunciatore dare la notizia che avrebbe ricevuto il premio Nobel nella fisica insieme a Brattain e a Shockley per l'invenzione del transistor. Dopo quel giorno Bardeen fu ancora più affascinato dalla ricerca, che prendeva la gran parte del suo tempo nell'università dell'Illinois: la superconduttività. Nel 1957, con il dottorando Leon Cooper e l'allievo laureato Bob Schrieffer, Bardeen sviluppò la prima teoria su come i metalli estremamente freddi possano condurre così efficientemente l'elettricità. Oggi questa teoria è conosciuta come la teoria BCS (che sta per Bardeen, Cooper e Schrieffer). Nel 1972, i tre uomini ricevettero un Nobel per il loro lavoro. John Bardeen fu l'unico uomo nella storia a ricevere due premi Nobel per la fisica.

Bardeen visse il resto dei suoi anni a Urbana, nell'Illinois, insegnando, ricercando e giocando al suo sport preferito: il golf. Morì nel 1991 all'età dei 82 anni.

1.4 Walter Houser Brattain

Amoy, Cina 1902 – Seattle 1987, fisico statunitense



Figura 1.4: Walter H. Brattain

Walter Brattain era un fisico che aveva una buona conoscenza della teoria, ma la sua forza era nella realizzazione degli esperimenti. Lavorando con le idee di William Shockley e di John Bardeen, le mani del Brattain hanno costruito il primo transistor. Suo padre Ross e sua madre Otilie si sposarono subito dopo che lui si fu diplomato al Whitman College di Walla Walla, nello stato di Washington. Ross ottenne un lavoro da insegnante di scienze e di matematica in Cina e Walter Houser Brattain nacque il 10 febbraio 1902 ad Amoy. Non soggiornò all'estero a lungo: entro il 1903, i Brattain erano tornati a Washington. Walter spese la maggior parte della sua gioventù in un grande ranch di bestiame ai confini con il Canada. Quando non stava studiando o non era a scuola, Walter aveva poco tempo per qualcosa che non fosse altro che aiutare nel ranch. Era un cowboy.

Sul finire del 1920, Brattain entrò al college di Whitman. Sosteneva di essere preparato in

fisica e in matematica perché erano le uniche materie in cui era bravo. Brattain durante il periodo scolastico assistette ad una svolta nella scienza americana, quando la fisica si stava trasformando. Gli allievi più vecchi avrebbero voluto viaggiare in Europa per una formazione in fisica di prim'ordine, ma Brattain era tra coloro che avrebbero potuto fare bene anche negli Stati Uniti.

Incoraggiato dal suo professore Benjamin Brown a continuare i suoi studi, Brattain si iscrisse all'università dell'Oregon per un master e all'università del Minnesota per il *Ph.D.*. Il primo lavoro di Brattain dopo la laurea fu al National Bureau of Standards come ingegnere radiofonico, ma dopo un anno passato là dentro, desiderò tornare alla fisica. Ad una riunione dell'American Physical Society, stava quasi per chiedere al suo relatore della tesi, John Tate, un aiuto. Ma prima che dicesse qualcosa, Tate lo introdusse a Joseph Becker dei Laboratori Bell. Il 1 agosto 1929, Brattain prese impiego al laboratorio di Becker a New York City. Lavorando con Becker, Brattain passò la maggior parte del suo tempo a studiare i raddrizzatori in rame-ossido. I due pensavano che avrebbero potuto realizzare un amplificatore mettendo una minuscola griglia di metallo in mezzo al dispositivo, simile a quanto si vedeva nella progettazione delle valvole elettroniche. Alcuni anni più tardi, William Shockley venne da lui con un'idea simile. Né l'uno né l'altro dispositivo hanno realmente mai funzionato.

Lavorando con i cristalli ebbero finalmente successo. Il 6 marzo 1940, Brattain e Becker furono chiamati nell'ufficio del presidente della Bell, Mervin Kelly. Lì videro un misterioso cristallo lavorato da Russell Ohl che incrementava il voltaggio quando veniva esposto ad una fonte luminosa. Si presentava come una giunzione p-n molto grezza, ma nessuno a quei tempi la conosceva ancora. Brattain, che dapprima pensò che si trattasse di uno scherzo, diede l'improvvisata spiegazione che la corrente elettrica stava generando una barriera all'interno. Quella teoria è risultata essere vera. Kelly rimase adeguatamente impressionato.

Brattain passò gli anni della II Guerra Mondiale lavorando sulle tecnologie di rilevamento dei sommergibili e quindi tornò ai Laboratori Bell per trovare che Kelly stava riorganizzando i ricercatori. Brattain fu assegnato ad un nuovo gruppo sullo stato solido con Stanley Morgan e Bill Shockley alla guida. Anche John Bardeen, un amico di suo fratello Robert, si unì presto al gruppo. L'abilità di Bardeen era nella teoria, mentre quella di Brattain era nello sperimentare.

I due uomini presto cominciarono a lavorare insieme meravigliosamente: Bardeen guardava Brattain condurre gli esperimenti ed offriva ipotesi sui risultati.

Il rapporto fra Brattain e Bardeen fu produttivo sfociando in quello che è noto come "il mese del miracolo". Per quattro settimane i due uomini fornirono geniali idee, una dopo l'altra. In quel mese svilupparono parecchi dispositivi, ognuno migliore del precedente, anche se si andava avanti per piccoli miglioramenti. Si arrivò al dunque martedì 16 dicembre: Brattain si sedette all'ennesimo tentativo di costruire un amplificatore. Diede tensione e quella volta sembrò funzionare correttamente. Dopo che il transistor con contatti a punte metalliche (*point-contact transistor*) venne costruito, un disaccordo tra le personalità di Bardeen, Shockley e Brattain ebbe la meglio, portando al disfacimento di quel gruppo di ricerca che era stato così in sintonia. La disputa era su che credito Shockley avrebbe avuto dall'invenzione. Era alla guida della squadra, ma lavorava nella ricerca per conto suo a casa, lasciando Bardeen e Brattain da soli. L'amministrazione dei Laboratori Bell insistette che Shockley apparisse in ogni immagine pubblicitaria. Era il capo del gruppo e meritava di essere là. Ma il suo nome rimase fuori dal brevetto. Questo però non fece sentire per niente meglio Bardeen e Brattain nei confronti di Shockley.

Nel corso degli anni successivi, Brattain continuò a lavorare nel gruppo del transistor di Shockley, ma solitamente non era invitato a lavorare alle ricerche più interessanti. Presto smise di presentarsi a Shockley di propria iniziativa e finalmente chiese di essere trasferito ad un altro gruppo. Molto più felice lontano da Shockley, Brattain rimase alla Bell fino a che non andò in pensione nel 1967.

Alle 7 del mattino di giovedì 1 novembre 1956, Brattain era a casa quando ricevette una telefonata da un giornalista. Aveva ricevuto il premio Nobel per l'invenzione del transistor. Dopo essersi ritirato dal lavoro ai Laboratori Bell, Brattain tornò a Walla Walla per insegnare al suo *alma mater*, il Whitman College. Lavorò sulla biofisica, tenendo un corso di fisica per gli specializzandi di materie non scientifiche. Morì di Alzheimer all'età di 85 anni il 13 ottobre 1987.

1.5 William Bradford Shockley

Londra 1910 – Stanford, California 1989, fisico statunitense



Figura 1.5: William B. Shockley

William Bradford Shockley fu chiaramente uno degli scienziati più intelligenti del XX secolo, tuttavia visse una vita tumultuosa. Fu un eroe moderno preso da una delle antiche tragedie greche e portato in un'era che contribuì ad inventare. Come Oreste e Edipo, Shockley fu guidato dal demone interno dell'arroganza. Diversamente da Oreste e da Edipo, tuttavia, non trovò mai la redenzione.

Shockley fu la guida della squadra che inventò il transistor, l'invenzione del XX secolo. Ci furono uomini offesi dalla sua personalità arrogante e dai punti di vista impopolari che avrebbero voluto denigrare i suoi meriti nell'invenzione del transistor. Ma fu il padre della Silicon Valley e la sua azienda aprì un settore tecnologico da cui sarebbero emerse le aziende e le tecnologie dominanti di tutta la valle. Era un sostenitore della scienza e della ricerca in America, cominciata durante la II Guerra Mondiale, relegato ad un lavoro di calcoli che probabilmente ha salvato decine di migliaia di vite umane. Anche se ha ricevuto il più alto onore civile possibile per il suo lavoro, quel lavoro è stato dimenticato a lungo. Egli e un suo collega contribuirono persino ad inventare un dispositivo nucleare lavorando indipendentemente dagli scienziati del Progetto Manhattan a Los Alamos. La sua analisi sugli effetti del bombardamento aereo può anche avere contribuito alla decisione di sganciare la bomba atomica sul Giappone.

E per concludere, spronò la scienza moderna facendo le domande che nessuno voleva fare, e molto meno rispondere. Ciò distrusse la sua reputazione. Shockley assistette a come la ricchezza e la gloria andassero ad altri, compresi gli uomini che allontanò dalla sua presenza per il suo orgoglio e la sua rozzezza. Morì in disgrazia e abbastanza in solitudine, tranne che per la compagnia della sua leale moglie, Emmy.

Shockley veniva da una lunga discendenza aristocratica americana, provenendo, da parte del padre, direttamente da John Alden e da Priscilla Mullins del Mayflower. Suo padre William, era un ingegnere minerario laureatosi al MIT. La madre, May, originaria del Missouri, fu una

delle prime donne laureate alla Stanford University, specializzata in arte e matematica. Diventò la prima ispettrice nel territorio delle miniere d'argento in Nevada. William era 24 anni più vecchio di lei; era già sui 50 anni.

Si sposarono nel 1908 e si trasferirono a Londra, dove William ebbe un contratto di lavoro. L'unico loro bambino, William Bradford, nacque là il 13 febbraio del 1910. Il giovane William era un bambino infelice: dal cattivo temperamento, viziato, quasi incontrollabile, che rese difficile la vita ai suoi genitori. Erano gente riservata, sospettosa, vagamente paranoica, apparentemente incapaci di vivere in un posto per più di un anno. Riuscì a far passare questo temperamento a loro figlio. Dopo un fallimento finanziario a Londra, si spostarono tornando a Palo Alto, in California, vicino a Stanford. Shockley passò la sua infanzia in quei luoghi, spostandosi da una casa all'altra. Lo mantennero fuori dalla scuola pubblica fino all'età di otto anni, credendo che sarebbe stato meglio educarlo a casa. Ciò contribuì a privarlo di un'utile socializzazione. Solo dopo che William morì nel 1925 e May si spostò con suo figlio a Hollywood questi ebbe una qualche stabilità.

Shockley si iscrisse al California Institute of Technology nel 1928 per specializzarsi in fisica. I suoi scherzi pratici sono ancora tra gli aneddoti che si tramandano al campus. Il periodo trascorso a Caltech cadde durante il grande fermento intellettuale che c'era attorno alla fisica dei quanti. Shockley, a quanto pare, aveva acquisito molto a riguardo, con stupefacente facilità. Seguendo i passi di suo padre, si iscrisse al MIT per conseguire il *Ph.D.* nell'autunno del 1933, guadagnando rapidamente la reputazione di studente brillante. L'estate del suo primo anno, sposò Jean Alberta Bailey, una conoscente di sua madre, dopo che rimase incinta. La loro figlia nacque in inverno, era disinteressata a lei, ma fu un padre gentile.

Shockley divenne il protetto di Philip Morse, un grande uomo della rinascita e una colonna portante dell'istituzione della fisica. Attraverso Morse, Shockley ottenne un lavoro ai Laboratori Bell dell'American Telephone & Telegraph Co., dapprima a New York City, e successivamente in New Jersey. Era evidente che aveva un talento unico e un intelletto prodigioso: Shockley avrebbe potuto prendere in considerazione un problema e risolverlo più velocemente di chiunque altro ai Laboratori Bell e risolse problemi in modi inimmaginabili. Del tutto per caso, egli e un collega progettaronο un reattore nucleare che aveva un grande potenziale. Nel 1939, gran parte della comunità fisica era interessata agli avanzamenti

crescenti verso la fissione ottenuta dagli scienziati Europei. Shockley ed il suo amico James Fisk furono assegnati dai laboratori per esaminare il potenziale per la fissione come fonte di energia. Agli uomini era stata data una piccola stanza e dell'apparecchiatura da laboratorio. In due mesi, lui e Fisk progettarono uno dei primi reattori nucleari del mondo. Il loro rapporto finì immediatamente a Washington. Il governo lo classificò subito, persino mantenendolo segreto ai propri scienziati. Le autorità combatterono ogni tentativo di Fisk e Shockley o dei Laboratori Bell di brevettarlo. Solo dopo la fine della guerra i fisici del Progetto Manhattan vennero a conoscenza del reattore. Nel frattempo avevano avuto bisogno di scoprire gli stessi concetti da loro stessi. Shockley può aver salvato migliaia di vite senza aver lasciato la sua scrivania. Quando la guerra scoppiò, Morse fu reclutato per la ricerca sui problemi delle munizioni della marina USA, principalmente delle bombe di profondità. Shockley si offrì volontariamente per raggiungere l'ufficio di Morse, e l'Anti-Submarine Warfare Operations Group.

Sotto la guida di Morse, Shockley e la sua squadra risolsero il problema della bomba di profondità e gli attacchi riusciti contro gli U-boot tedeschi aumentarono di un fattore cinque. L'arma principale di Shockley era la scienza delle ricerca operativa, allora in gran parte ignorata negli USA, ma già utilizzata per gli sforzi bellici dai britannici. Egli quindi produsse un cambiamento nel modo in cui la U.S. Navy cercava i sommergibili, migliorando ancora il rapporto di attacchi riusciti. Inventò le tattiche per i convogli atlantici per eludere i bombardieri tedeschi, dopo determinazioni statistiche, perché i bombardieri non disponevano del radar, e questo senza mai aver visto un convoglio o un bombardiere. Shockley si fermò nel Army Air Corps dell'esercito, per aiutare le squadre di bombardieri di treni nel teatro di guerra europeo. Divenne uno degli scienziati civili di Los Alamos di più alto grado ed era il custode di alcuni dei segreti più importanti tenuti dagli USA. Viaggiò dappertutto nel mondo. Dalla fine della guerra, essenzialmente aveva progettato l'addestramento delle squadre di bombardieri americani e aveva trovato come aumentare la loro efficacia anche durante il cattivo tempo. Vinse la medaglia nazionale al merito.

Malgrado il suo passo frenetico e l'importanza assunta, egli era un uomo infelice, con tendenze suicida, tentando la roulette russa contro se stesso. Lui e Jean avevano due figli. Con loro era un padre distante e spesso psicologicamente crudele. Poco affettuoso e anche poco

contraccambiato. Il suo matrimonio cominciò ad andare in crisi. Quando la guerra si concluse, Shockley tornò ai Laboratori Bell e cominciò la sua scalata verso l'amministrazione di quello che era a quei tempi il miglior laboratorio industriale del mondo. Aiutò i laboratori ad impiegare gli ingegneri, gli assistenti tecnici e i fisici migliori che avrebbero potuto trovare. Il suo talento per assumere talenti era superbo.

Walter Brattain era già stato assunto ai laboratori. Lui e Shockley avevano provato a costruire un amplificatore a semiconduttore per sostituire gli onnipresenti tubi a vuoto, prima della guerra, ma avevano fallito. Shockley allora impiegò John Bardeen, un teorico brillante dell'università del Minnesota. Volevano tornare alla ricerca di un dispositivo sostituto del tubo a vuoto.

Shockley aveva teorizzato un dispositivo usando un effetto campo, ma per motivi che nessuno riusciva a capire, quello non funzionava. Bardeen cominciò a lavorare per scoprire il perché. Il 19 marzo 1946, Bardeen riusciva a produrre una teoria che spiegava il motivo del fallimento. Lui e Brattain si misero immediatamente al lavoro per costruire su quella interpretazione. Stranamente, Shockley non lo fece. Anche se era il leader della squadra, essenzialmente lavorava a casa alle proprie idee, lasciando Bardeen e Brattain da soli. Fu un grande errore! I due uomini lavorarono freneticamente tra l'estate e l'autunno. Shockley passava irregolarmente a trovarli per vedere che cosa stavano facendo, formulando suggerimenti occasionali, mirandoli in diverse direzioni. Il passo avanti venne in novembre ed il 16 dicembre 1947, Brattain e Bardeen produssero il transistor a punte metalliche (*point-contact transistor*) il primo prototipo di transistor.

Shockley era, sia fiero della loro realizzazione, sia furioso perché erano riusciti dove egli aveva fallito. Alcune settimane più tardi, rifugiatisi in una stanza di un albergo di Chicago, dove stava assistendo al convegno dell'American Physical Society, andò oltre dichiarando che il point-contact transistor sarebbe stato superato dall'invenzione del sandwich transistor. Il sandwich transistor e il più avanzato transistor a giunzione che si sarebbe sviluppato da questo, sarebbe stato più facile in termini di produzione di massa ed ancora oggi è usato per le applicazioni speciali. Questo mise i Laboratori Bell in un dilemma. L'amministrazione voleva sapere cosa stava accadendo di importante, ma Bardeen e Brattain avevano prodotto da se stessi il primo transistor. Shockley era capo della loro squadra e sembrava sconveniente che

lui non ottenesse dei crediti, particolarmente perché aveva prodotto un dispositivo ancora migliore. Quindi, l'amministrazione dei Laboratori decise che ogni foto che ritraesse gli inventori del transistor avrebbe dovuto includere anche William Shockley. Inoltre sarebbe stato il portavoce ufficiale; Bardeen e Brattain non erano interessati alla pubblicità. Shockley non protestò, ma l'imposizione dall'amministrazione irritò presto i suoi colleghi, entrambi i quali avevano già sviluppato una sana avversione verso Shockley. Nessuno chiese perché il nome di Shockley non era sul brevetto originale del transistor a punte metalliche. Il suo nome è invece sul brevetto del transistor bipolare a giunzione. Shockley non ha mai provato a prendere il merito di Brattain e di Bardeen, ma si sforzò di assicurarsi che anche lui fosse incluso. E ci riuscì: i tre uomini vinsero il premio Nobel per la fisica nel 1956. Il premio di Shockley ha sempre irritato coloro che impararono a odiarlo. Brattain rifiutò di lavorare ancora per lui. Piuttosto che lavorare con Shockley, Bardeen rinunciò al suo lavoro ai Laboratori Bell.

Anche l'invenzione del transistor unipolare ad effetto di campo JFET (*Junction Field Effect Transistor*) si deve a Shockley. L'idea di usare un campo elettrico esterno perpendicolare alla superficie del semiconduttore per controllare la densità dei portatori nel semiconduttore in prossimità della superficie fu infatti oggetto dei suoi studi fin dal 1943. Tuttavia la difficoltà (se non l'impossibilità) di realizzare dispositivi in cui l'idea di principio non fosse mascherata da fenomeni fisici parassiti, non permise reali approfondimenti fino al 1952, quando pubblicò la proposta di un transistor ad effetto di campo a giunzione, corredandola di uno studio approfondito del suo funzionamento. A questo scritto fece seguito, pochi mesi dopo, la conferma sperimentale delle proprietà descritte.

Nel febbraio del 1953, alla moglie Jean fu diagnosticato un cancro all'utero. Shockley si prese cura di lei e la fece ricoverare. Mentre la moglie stava recuperando, tuttavia, le annunciò che la stava lasciando. Shockley inoltre lasciò i Laboratori Bell, prendendo un lavoro alla Caltech, azienda che sarebbe stata la culla dei suoi interessi futuri. L'anno successivo conobbe un'infermiera psichiatrica, Emily Lanning. Si sposarono il 23 novembre 1955 a Columbus, in Ohio. Cominciò una lunga e intensa vita affettiva tra i due, che durò più di 30 anni.

Shockley stava per creare uno dei più grandi motori tecnologici che il mondo abbia mai visto. Divenne socio dell'imprenditore Arnold Beckman che finanziò un'azienda per Shockley, la

Shockley Semiconductor, per costruire semiconduttori. Decisero che l'azienda sarebbe stata vicino a Stanford, nella California del nord. Shockley notava il vantaggio che avrebbe avuto la vicinanza con l'università, inoltre comprese che la bellezza del territorio, l'accesso alle montagne e all'oceano, le condizioni climatiche perfette avrebbero attirato talenti. Shockley si era ormai convinto di essere un esperto sulla gestione di gente creativa. Usò il suo talento senza pari per formare una piccola ma stupefacente squadra di ricercatori. Shockley aveva raggiunto l'apice del suo potere e delle sue occasioni. Quindi venne la caduta. Arrogante, poco disposto a ascoltare, mancante di tatto e risoluto, non avrebbe voluto ripetere gli errori che fece con Brattain e Bardeen, e infine l'innata paranoia di Shockley irruppe. Nel settembre 1957, meno di un anno dopo che Shockley avesse vinto il premio Nobel, otto dei suoi ricercatori migliori, rinunciarono a lavorare per lui, per formare la loro propria azienda, la Fairchild Semiconductor; tra questi c'erano anche Gordon Moore e Robert Noyce che qualche anno più tardi, nel 1968, fondarono la Intel Corporation. Questi uomini guadagnarono incredibili fortune e diressero l'innovazione nell'era dell'elettronica, essenzialmente realizzando il sogno di Shockley, mentre Shockley sarebbe solo stato a guardare.

La sua azienda, privata dei relativi talenti migliori, annaspava, mentre tutt'intorno nascevano nuove aziende che discendevano direttamente dalla Shockley Semiconductor. E un'ultima ironia della sorte, sebbene gli odierni transistor sono basati sul disegno originale dell'effetto campo inventato da Shockley, egli tuttavia non ne produsse mai neppure uno. Shockley cominciò ad insegnare a Stanford e a detta di tutti era un insegnante superbo. Aveva studiato come insegnare la creatività, in particolare il problem solving e lo mise in atto con gli studenti non laureati della Stanford e gli allievi laureati di ingegneria ottenendone un effetto considerevole. Lavorò persino nella public school per aiutare gli insegnanti ad insegnare le scienze. Tuttavia si annoiava; aveva cominciato a trascurare la fisica, la sua azienda era stata venduta. Cominciò a fare conferenze sui problemi della popolazione, un argomento che lo aveva interessato fin dai suoi viaggi in India in tempo di guerra. Nel maggio del 1963, diede un discorso al Gustavus Adolphus College nel Minnesota che suggeriva come la gente meno competente a sopravvivere nel mondo erano quelle popolazioni che avevano un alto tasso di riproduzione, mentre la cosa migliore che la popolazione umana stava facendo era il controllo delle nascite per avere pochi bambini. Era scivolato nell'eugenetica.

In un'intervista dell'anno successivo all'U.S. News & World Report cadde nella trappola di un dibattito. Precisò che gli americani africani come gruppo avevano un quoziente intellettivo 15 punti più basso della media e suggeriva che la causa era ereditaria. Shockley si trovò, non infelicemente, in un turbinio di polemiche. I biologi e i genetisti fecero saltare le sue teorie, precisando che l'eugenetica era una spiegazione razionale usata dal Nazismo durante la II Guerra Mondiale e che era un'idea dai fondamenti scientifici deboli. Shockley era stato attaccato dalla stampa, dalla televisione e dalle pubblicazioni scientifiche. La battaglia era furiosa, incivile e spesso disonesta. Shockley, era un terribile argomentatore, perdeva le sue dispute il più delle volte. Anche se non aveva una formazione in genetica, studiava tale materia in maniera interessata.

Fu diffamato, ridicolizzato, umiliato e infine dimenticato. La sua reputazione era a brandelli, si ritirò a casa sua nella città universitaria di Stanford, finendo solo occasionalmente in esplosioni di rabbia, estraniandosi completamente da tutti, leale solo a sua moglie Emmy. Ebbe pochi amici. Non vedeva nessuno dei suoi figli da più di 20 anni, e soltanto occasionalmente parlava con sua figlia.

Morì di cancro alla prostata all'età di 79 anni, il 12 agosto 1989, sul letto di morte aveva Emmy al suo fianco. I suoi figli appresero dell'accaduto dai giornali.

Capitolo 2 - Il ruolo del silicio

I semiconduttori sono materiali che stanno a metà tra i conduttori e gli isolanti. La particolarità dei semiconduttori è che la loro conducibilità è variabile e dipende da molteplici parametri fisici quali la temperatura, l'illuminazione, il campo magnetico e la concentrazione di impurità presenti nel cristallo. Questa variabilità li rende particolarmente utili in ambito elettronico. La loro scoperta, ma soprattutto il loro utilizzo, con in testa il massimo rappresentante, il silicio, coincide con lo sviluppo dei dispositivi a stato solido.

2.1 I semiconduttori

Una delle prime osservazioni sperimentali delle caratteristiche dei materiali semiconduttori è dovuta a M. Faraday il quale, nel 1833, trovò che il solfuro d'argento presenta un coefficiente di temperatura negativo. Gli impetuosi sviluppi delle applicazioni tecnologiche dei semiconduttori ebbero però inizio con lo studio approfondito di due elementi semiconduttori, il silicio e il germanio che, nel 1947, portò J. Bardeen e W. Brattain a realizzare il primo dispositivo a semiconduttore, il transistor. La maggior parte delle potenzialità dei semiconduttori vennero, però, delineate nella sintesi della teoria del dispositivo pubblicata da W. Shockley nello stesso periodo. Le ricerche sui materiali semiconduttori si sono poi indirizzate a migliorarne le prestazioni, in particolare la velocità di commutazione, parametro essenziale dei circuiti logici basati su due stati (due livelli di tensione). Per ampliarne i campi di applicazione, in particolare in rapporto all'emissione e all'assorbimento della radiazione elettromagnetica, negli anni Cinquanta sono stati realizzati semiconduttori ad arseniuro di gallio, il costituente del diodo LED e del laser a semiconduttore, usati, per esempio, nei compact disc e nelle telecomunicazioni basate sui sistemi a fibra ottica. Si sono infine raffinate le tecniche di fabbricazione, tecniche che hanno consentito la produzione industriale di chip con milioni e milioni di transistori.

2.1.1 Struttura

I materiali semiconduttori che si usano in elettronica hanno una struttura monocristallina, ovvero sono dei cristalli ordinati con periodicità tridimensionale che si estende per tutto il

cristallo. In natura la maggior parte dei materiali è in forma policristallina, per ottenere dei monocristalli di materiale semiconduttore occorrono dei particolari processi termici e chimici da cui si ricavano dei lingotti monocristallini. A partire da questi si realizzano tutti i dispositivi elettronici esistenti. I semiconduttori hanno una struttura cristallina come quella del Diamante o, nel caso di quelli composti, simile a quella del diamante ma con atomi misti. Intuire e successivamente dimostrare la loro struttura non è stata una cosa immediata.

La scoperta dell'esistenza dell'elettrone non arrivò prima del 1897, ad opera di J.J. Thomson, addirittura quindici anni dopo l'invenzione del primo diodo a cristallo di K.F. Braun, targata 1874. Questa scoperta fece luce sulla causa di molti aspetti fino ad allora solo ipotizzati. Pochi anni dopo, infatti, V.E. Riecke scoprì che la corrente elettrica nei metalli era dovuta al moto degli elettroni, e K. Baedeker dimostrò che la concentrazione degli elettroni e il carattere metallico dello ioduro di rame, aumentavano con la temperatura, teoria confermata dagli studi di Gudden, il quale nel 1930 ipotizza che sostanze pure non possono essere semiconduttori, e che solamente la presenza di impurezze permetta alle sostanze di comportarsi da semiconduttori. Nel frattempo, J.J. Lilienfeld brevetta il concetto di un amplificatore a stato solido basato sul solfato di rame. Si conosce il funzionamento, ma non ancora la struttura dei semiconduttori.

Bisogna attendere Alan Wilson, che nel 1931 propone una teoria a bande dei solidi, e descrive il comportamento dei semiconduttori nell'ambito di questa teoria. Sviluppando gli studi di Gudden, introduce anche il concetto di elementi donatori ed accettori. In questa struttura ogni atomo è circondato da altri quattro atomi e condivide con questi i quattro elettroni presenti nella sua orbita più esterna. Questo tipo di condivisione è conosciuto come *legame covalente*. Ogni coppia di elettroni in condivisione costituisce un legame covalente. Questo legame può realizzarsi tra atomi della stessa specie o tra atomi di specie diverse che presentino la stessa configurazione elettronica del guscio esterno. Questo tipo di legame è spiegabile come una perturbazione della funzione orbitale degli elettroni dovuta alla presenza degli atomi all'interno del reticolo. A bassa temperatura gli elettroni sono intrappolati nei legami covalenti e non permettono pertanto la conduzione di corrente elettrica nel cristallo. Superata invece una certa temperatura i legami diventano meno saldi e gli elettroni possono essere strappati via dal loro posto per mezzo di un campo elettrico realizzando così conduzione di corrente

elettrica. In particolare, aumentando la temperatura si fornisce al materiale una parte dell'energia necessaria ai portatori a superare la barriera di potenziale costituita dai legami atomici.

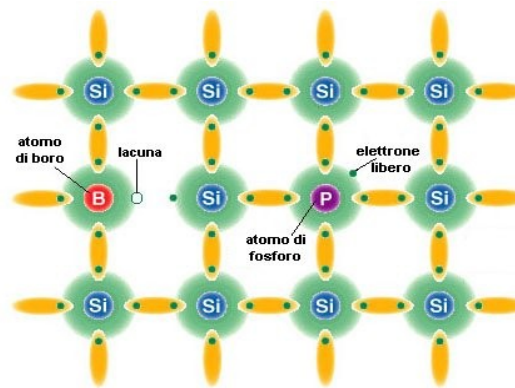


Figura 2.1: Legami di silicio drogato, utilizzano il boro ed il fosforo per ottenere rispettivamente una struttura di tipo-p ed una di tipo-n

2.2 Il silicio

Le proprietà del silicio hanno determinato il suo impiego nella realizzazione dei dispositivi a stato solido. A tale scopo si aggiungono al silicio puro, piccolissime quantità di altre sostanze, che modificano così ulteriormente le proprietà del materiale (figura 2.1). In questo caso si dice che il silicio viene "drogato". I circuiti integrati moderni sono costruiti sovrapponendo, come in un wafer, vari strati di silicio drogati in modo diverso.

2.2.1 Perché il silicio

I semiconduttori possono essere composti da una sola specie atomica, come il Silicio e il Germanio, oppure da più specie atomiche come l'Arseniuro di Gallio o l'Antimoniuro di Indio. Nel corso della storia, a partire dal XIX secolo, molti studi sono stati fatti sui semiconduttori ma solo nei primi anni del XX secolo si è riusciti a realizzare dei veri e propri dispositivi elettronici che comunque hanno convissuto con le valvole termoioniche per moltissimi anni. I primissimi dispositivi furono realizzati lavorando il Germanio, ma alla fine ha prevalso su tutti, come materiale principe, il Silicio. Quest'ultimo non è certamente il materiale migliore in assoluto per caratteristiche elettroniche, ma ha delle caratteristiche

premianti rispetto agli altri. Innanzitutto il 75% della crosta terrestre è fatto di Silicio, quindi costa poco ed è praticamente inesauribile. È un materiale estremamente facile da lavorare, ha un modulo di Young (parametro che caratterizza la resistenza del solido alla deformazione uniassiale) paragonabile a quello dell'acciaio e in più ha un ossido molto buono dalle ottime capacità isolanti. Purtroppo il Silicio non è elettro-ottico ma questo non ne ha impedito la diffusione anche in ambito optoelettronico.

2.2.2 Da Berzelius alla Valle del Silicio

L'interesse iniziale per il silicio è venuto da parte dei chimici. Questo semiconduttore fu isolato per la prima volta nel 1824 dal chimico svedese Berzelius che aveva seguito il consiglio del grande chimico francese Lavoisier il quale, avendo studiato il quarzo, affermò che era composto da un elemento molto importante. Ma il silicio non ha trovato alcun utilizzo fino alla fine del XIX secolo, quando il Mendeleev ha scoperto che, se unito al ferro, sviluppava proprietà magnetiche. E così è stato impiegato per gli elettromagneti e trasformatori. Da quel momento è stato prodotto chimicamente in una forma ragionevolmente pura, pari forse al 98%.

Dopo i primi impieghi nell'industria metallurgica il silicio lasciò presto le fonderie per scopi, diciamo così, più raffinati. E fece la sua comparsa nel mondo della radiotelegrafia. Ma fu con lo sviluppo del radar, negli anni della Seconda guerra mondiale, che il silicio iniziò la sua vera carriera di imperatore dell'elettronica.

Il grande impatto del silicio si deve al suo impiego nella costruzione della madre di tutte le invenzioni elettroniche: il transistor. Furono William Shockley, John Bardeen e Walter Brattain, tre ricercatori dei Bell Telephone Laboratories a inventare questo straordinario dispositivo, e per questo vinsero il premio Nobel per la fisica nel 1956. Il silicio è un elemento che appartiene allo stesso gruppo chimico del carbonio e di un altro protagonista famoso nel mondo delle tecnologie avanzate, il germanio. Quando è allo stato puro forma dei cristalli che hanno una struttura molto simile al diamante. Ma per ciò che riguarda l'elettronica, la caratteristica principale del silicio è di essere un materiale semiconduttore.

Nel 1951, una società di Dallas che fino ad allora si era occupata soprattutto di introspezioni

geologiche per l'industria del petrolio, decise che il transistor sarebbe diventato il suo nuovo business. Si chiamava, e naturalmente si chiama anche oggi, Texas Instruments Incorporated . Uno dei suoi ingegneri, Patrick Haggerty , fu tra i primi a intuire le possibilità di questo dispositivo.

Nel 1964 Patrick Haggerty , che era a capo della Texas Instruments , quando il transistor stava cominciando a divenire popolare, scrisse che il transistor avrebbe completamente rivoluzionato tutto il mondo della comunicazione. Lui fu cauto; diceva che prima sarebbe stato necessario mettere a punto la tecnologia. Un anno dopo Gordon Moore , quando già ci trovavamo in un nuovo scenario, ripeté ciò che Haggerty aveva detto e aggiunse che i costi si sarebbero dimezzati ogni due anni , il che si è puntualmente verificato.

Anche la International Business Machine, cioè la IBM , che fino a quel momento fabbricava soprattutto macchinari per ufficio, prese la “strada del silicio”. L'introduzione dei transistor al silicio permise di sostituire le vecchie valvole che erano molto più grandi e consumavano molta più energia. La strada verso calcolatori sempre più piccoli, ma allo stesso tempo sempre più potenti, era ormai aperta.

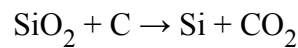
Nel 1955 William Shockley , uno degli inventori del transistor, lasciò i laboratori Bell per fondare una società sua, la Shockley Transistor Corporation. Shockley era californiano e stabilì la sua società a Palo Alto. Lì fu solo la prima di una vera e propria giungla di iniziative che cominciarono a sorgere lì attorno. Tante che oggi tutta la zona è nota nel mondo intero come Silicon Valley: la valle del silicio.

2.3 Produzione

Nella sua forma cristallina, il silicio venne realizzato per la prima volta da Deville, nel 1854, attraverso l'elettrolisi di *impure sodium-aluminum chloride* con circa il 10% di silicio. All'inizio del XX secolo (1907), fu Potter a studiare le interazioni tra silicio e carbonio, di fatto scoprendo la strada per ottenere silicio per usi commerciali per l'intero secolo.

Per la produzione di silicio si parte dalla silice SiO_2 (sabbia), uno degli elementi più abbondanti in natura. Questa viene fatta reagire in una fornace con carbonio per produrre

quello che si chiama il silicio di qualità metallurgica (*Metallurgical Grade Silicon, MGS*), di purezza circa 98%. A temperature superiori a 1900°C, il carbonio riduce la silice in silicio secondo l'equazione chimica



Per raggiungere gradi di purezza superiori necessari per realizzare dispositivi elettronici a semiconduttore, è necessario praticare un'ulteriore purificazione.

2.4 Purificazione

Il primissimo sistema di purificazione, descritto nel 1919 e usato su scala limitata per la fabbricazione di componenti dei radar durante la seconda guerra mondiale, richiedeva la polverizzazione del silicio di grado metallurgico e la sua parziale dissoluzione in acido. Quando veniva polverizzato, il silicio si spezzava in modo che le zone più deboli e ricche di impurità restassero all'esterno del risultante grano di silicio. Di conseguenza, il silicio ricco di impurità era il primo a disciogliersi quando trattato con l'acido, lasciando un prodotto più puro, ed ottenendo l'*Electronic Grade Silicon*. Sebbene l'EGS fosse relativamente puro, era ancora in forma policristallina, non utilizzabile per i dispositivi elettronici. Erano indispensabili altre purificazioni.

Le prime tecniche di purificazione del silicio erano basate sul fatto che quando il silicio viene fuso e risolidificato, l'ultima parte di silicio che solidifica contiene la maggior parte delle impurità.

2.4.1 Fusione a zona

Nella fusione a zona, il primo metodo di purificazione del silicio ad essere utilizzato su scala industriale, sbarre di silicio di grado metallurgico venivano riscaldate partendo da una delle sue estremità, fino a quando questa iniziava a fondersi. Il riscaldatore quindi veniva lentamente spostato lungo la sbarra mantenendo una piccola porzione fusa mentre il silicio si raffreddava e risolidificava dietro di essa. Poiché la maggior parte delle impurità tendeva a rimanere nella parte fusa piuttosto che risolidificarsi, alla fine del processo queste si erano

spostate nell'ultima parte della sbarra ad essere fusa. Questa estremità veniva quindi tagliata e gettata, ripetendo il processo se una purezza più elevata era necessaria.

2.4.2 Metodo Czochralski

Il processo Czochralski è una tecnica introdotta nei sistemi produttivi industriali agli inizi degli anni '50, che permette di ottenere la crescita di monocristalli di estrema purezza. In ambito industriale tale processo è impiegato principalmente nella crescita di blocchi di silicio, che si ottengono con la forma di pani cilindrici. Il processo prende il nome dal ricercatore polacco Jan Czochralski, che lo scoprì nel 1916, mentre stava studiando la cristallizzazione dei metalli. Il processo consiste nel sollevamento verticale (tramite un apparato chiamato 'puller' o estrattore) e contemporaneamente nella rotazione antioraria, di un seme monocristallino di silicio, appropriatamente orientato. Il seme viene quindi introdotto nel silicio fuso: la parte del seme 'immersa' fonde, ma la parte restante lambisce la superficie del fuso. Durante il sollevamento/rotazione, avviene una progressiva solidificazione all'interfaccia fra solidi e liquido, generando un monocristallo di grandi dimensioni.

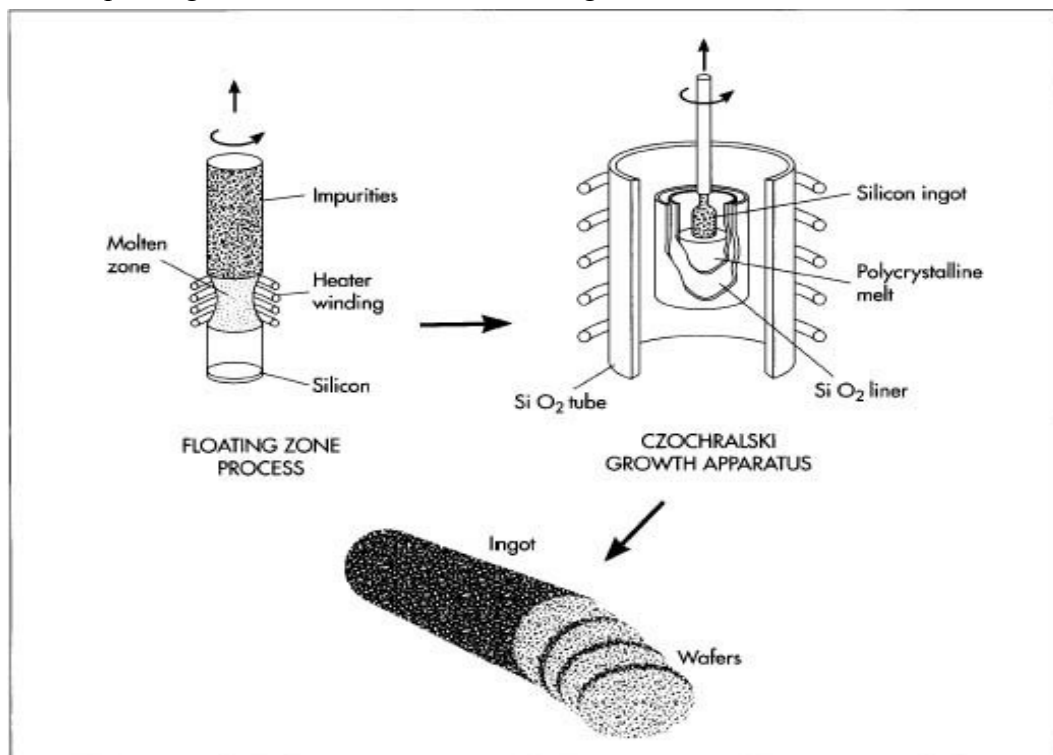


Figura 2.2: Metodo Czochralski

Le velocità di crescita tipiche, si aggirano intorno ad alcuni millimetri al minuto. L'operazione successiva consiste nel tagliare il fuso tramite un disco diamantato, ottenendo i sottili dischi con spessore di pochi decimi di millimetro, chiamati wafer; i wafer costituiranno quindi il supporto (substrato) per i diversi dispositivi elettronici. Dato che la quantità di dispositivi ricavabili da una singola fetta è proporzionale al suo diametro, col tempo si è cercato di realizzare fusi con diametro sempre maggiore.

Capitolo 3 - I primi dispositivi a stato solido

Già nel 1874 Ferdinand Braun osservò che la conducibilità di alcuni solfuri dipendeva dalla polarità della differenza di potenziale applicata. In seguito mostrò che l'effetto era più pronunciato se uno degli elettrodi aveva una forma appuntita ed era pressato sulla faccia del minerale. È il primo esempio di raddrizzatore basato sulle proprietà dei semiconduttori. Questo tipo di raddrizzatore, detto a baffo di gatto (*cat's whisker detector*), usato per la rivelazione di radioonde, fu sostituito poi dalle valvole termoioniche, quindi definitivamente soppiantato dalle giunzioni p-n, più affidabili, ma di certo fu il primo dispositivo a stato solido.

3.1 L'inizio di una grande metamorfosi

L'età dell'elettronica dei semiconduttori iniziò nel 1948 con l'invenzione del transistor. Tuttavia, questa era ebbe origine con il lavoro svolto in precedenza, tra il 1920 e il 1945. Durante questo periodo, lo studio delle proprietà elettromagnetiche di semiconduttori e metalli era stato per la maggior parte competenza dei fisici; notevoli contributi sono dovuti a Block, Davydov, Lark-Horowitz, Mott, Schottky, Slater, Sommerfeld, Van Vleck, Wigner, Wilson e altri nelle università di tutto il mondo. Ci furono anche tentativi di fabbricare dispositivi elettronici a stato solido: Lillienthal e Heil, negli anni '30 ricevettero un brevetto ciascuno per dispositivi di amplificazione a stato solido che furono i precursori del transistor a giunzione e di quello a effetto di campo MOS (FET). Tuttavia, questi dispositivi avevano prestazioni poco soddisfacenti se paragonati a valvole e relè, apparentemente non se ne comprendeva l'utilità e, con tutta probabilità, neppure l'inventore poteva spiegare la teoria alla base del dispositivo.

L'effetto raddrizzatore a punta (*point rectifier effect*), come era allora chiamato, è stato scoperto da Braun nel 1874. Sulla base di questo lavoro fu in seguito Pickard a sviluppare il diodo “baffo di gatto” utilizzando un cristallo di silicio, e brevettando il tutto nel 1906. Tuttavia, lo scienziato bengalese Jagadish Chandra Bose potrebbe essere stato il primo ad

utilizzare un semiconduttore per rettificare le onde radio, infatti richiese un brevetto su un rivelatore a galena nel 1901. Nel 1904 lo stesso Bose ottenne un altro brevetto negli Stati Uniti per un cosiffatto raddrizzatore: aveva trovato che il senso della rettifica dipendeva dal metallo ed anche dal tipo di cristallo. Diede così a questo raddrizzatore il nome di coesore (*coherers*) e poteva essere positivo o negativo. Oggi si conosce che la differenza era dovuta all'utilizzo di una cristallo di galena di tipo-n oppure di tipo-p. Inoltre usò questi dispositivi per rilevare le microonde e le radiazione ottiche e propose che gli ultimi avrebbero potuto costituire la base della conversione dell'energia solare. Senza nessuna meraviglia Neville Mott, dopo un'attenta valutazione del lavoro di Bose, sosteneva che il fisico era di sessanta anni in anticipo rispetto al suo tempo.

Quando questi dispositivi divennero di uso comune, iniziarono ad essere sviluppate versione “permanenti” del rivelatore, molte delle quali da G. W. Pickard, che ha provato più di 30.000 combinazioni di contatti cristallo-filo. Una parte di questi esperimenti verteva su

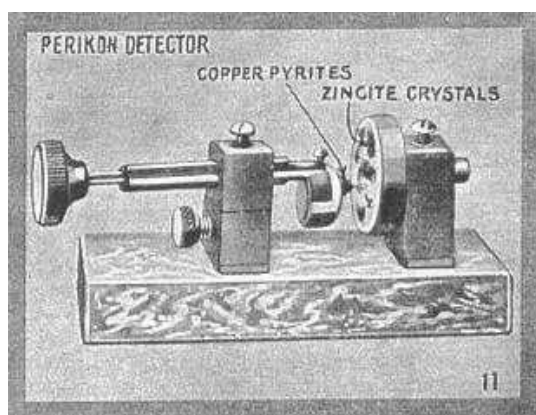


Figura 3.1: Perikon detector

combinazioni di coppie di cristalli diversi, quali ad esempio la zincite-bornite (quest'ultima è un minerale solfureo) oppure zincite-calcopirite. Pickard chiamò questo rivelatore *Perikon detector*, da "*PER*fect *pIcKard* *cON*tact". Ha ottenuto altri brevetti, incluso un rilevatore basato su cristallo di pirite di ferro. Pickard ha il merito di aver introdotto l'uso del silicio nei rivelatore, di cui ne sono testimonianza i

brevetti ottenuti nel 1906. Quasi nello stesso periodo, il generale Henry Harrison Chase Dunwoody ricevette il brevetto per un rivelatore che utilizzava il carburo di silicio, una sostanza artificiale ottenuta accidentalmente durante i tentativi di Edward Acheson di creare diamanti. Tuttavia, tutti questi nuovi dispositivi, dopo l'invenzione dei tubi a vuoto, divennero velocemente obsoleti. Si trattava comunque di una condizione temporanea. Infatti, con la necessità di andare a lavorare ad elevate frequenze, i dispositivi a vuoto incontrarono difficoltà insormontabili, e lasciarono definitivamente la scena al ritorno dei dispositivi a stato solido.

3.2 Cat's-whisker detector

L'invenzione del rivelatore "a baffo di gatto" da parte di Braun darà origine, dopo mezzo secolo, allo sviluppo dei rioricevitori a galena. Il diodo "a baffo di gatto" può essere considerato anche l'antesignano dei raddrizzatori a semiconduttore "a punta di contatto", che saranno inventati, dopo tre quarti di secolo, nei Laboratori Bell.

Braun trovò che i contatti metallici in mercurio sul solfuro di ferro o di rame davano una caratteristica corrente-tensione non lineare. Approfondendo queste scoperte arrivò alla realizzazione del dispositivo.

3.2.1 Il dispositivo

Nel dispositivo (figura 3.2) il filo, toccando la superficie del cristallo, formava una primitiva ed instabile giunzione a punta di contatto metallo-semiconduttore. Questa giunzione conduceva corrente elettrica in una sola direzione e si opponeva allo scorrere della stessa nella direzione opposta. Solo alcuni siti sulla superficie del cristallo, però, funzionavano come giunzione rettificante, ed il dispositivo era molto sensibile alla geometria esatta del cristallo ed alla pressione applicata tra filo di contatto ed il cristallo. Pertanto, la giunzione è stata realizzata in modo tale che fosse regolabile, ed il punto utile di contatto si trovava per tentativi ed errori, prima di ogni utilizzo. Il filo era sospeso, sostenuto da un braccio mobile, e poi lo si trascinava sulla faccia del cristallo fino a quando il dispositivo non iniziava a funzionare. Lo sviluppo del dispositivo avvenne parallelamente al crescente interesse nella realizzazione di radio a cristallo. In questo senso, un utilizzo del Cat's Whisker detector si ebbe sotto forma di demodulatore.



Figura 3.2: Cat's Whisker detector

L'operatore doveva sintonizzare la radio ad una stazione locale che avesse una potenza di segnale abbastanza forte, e quindi

regolare il baffo di gatto fino a quando la stazione non si sentiva dagli auricolari. Ciò richiedeva una certa abilità e molta pazienza, considerato che anche un buon contatto poteva essere perso facilmente con la minima vibrazione.

3.2.2 Galena e non solo

Il cristallo più utilizzato per realizzare il *Cat's Whisker detector* era la galena, minerale naturale che costituiva il lato semiconduttore della giunzione. La galena, chimicamente descritta come un solfuro di piombo, spesso contiene percentuali sensibili di argento, per questa ragione è nota anche come piombo argentifero. Quella con buone proprietà di rilevamento è rara e non ha caratteristiche visibili che la differenziano da campioni di galena con scarse proprietà di rilevamento. Considerando che la temperatura relativamente alta alla quale avveniva la saldatura piombo-stagno poteva danneggiare il minerale, il cristallo è stato montato su una lega con un basso punto di fusione (ben al di sotto 200°F), nota come *metallo di Wood*. Una superficie è stata lasciata libera per permettere il contatto con il filo del baffo di gatto (il quale altro non era che un pezzo di filo elastico di metallo sottile), assumendo il ruolo di parte metallica della giunzione.

Era comunemente usato un filo in fosforo di bronzo perché aveva la giusta quantità di elasticità. Veniva montato su un braccio regolabile con impugnatura isolata in modo che l'intera superficie esposta del cristallo potesse essere passata nelle varie direzioni per cercare di trovare il punto di lavoro ottimale per la giunzione. Oltre alla galena, storicamente, sono molti altri i minerali e i composti, che sono stati utilizzati come cristallo per realizzare esperimenti su dispositivi simili ed altri innovativi. I più importanti sono stati la pirite di ferro (disolfuro di ferro), il silicio, e il carburo di silicio (carborundum, SiC). Alcuni sono stati utilizzati proprio nel tentativo di migliorare il *Cat's Whisker*.

Un altro tipo di materiale veniva utilizzato nella giunzione cristallo-cristallo (due cristalli montati uno di fronte all'altro), in cui un cristallo veniva spostato in avanti su un meccanismo regolabile, fino a che le facce dei cristalli non si toccavano. La più comune in questo caso era una giunzione zincite-calcopirite (rispettivamente: ossido di zinco - minerale di rame ferro e zolfo). Era il *Perikon detector* (vedere figura 3.1). L'obiettivo dei ricercatori era quello di trovare incroci che non fossero troppo sensibili alle vibrazioni ed inaffidabili come galena e

pirite. Molte di queste giunzioni erano abbastanza stabili, permettendo l'utilizzo di un filo permanente per il contatto puntiforme, in sostituzione del "baffo di gatto". Queste giunzioni, più efficienti, vennero quindi utilizzate nelle installazioni di grandi dimensioni, come quelle commerciali, militari e nelle stazioni wireless, mentre il *Cat's Whisker* era impiegato in dispositivi utilizzati dai consumatori e dai radioamatori. Per aumentare la sensibilità, alcune di queste giunzioni, tra le quali quelle al carburo di silicio, sono state polarizzate collegando una batteria e un potenziometro tra di loro, per fornire una piccola tensione costante alla giunzione.

3.2.3 Le prime applicazioni commerciali

A partire dagli anni '10 la comunicazione si avvale dell'ausilio delle prime apparecchiature radio, le quali sfruttavano il cristallo di galena per ottenere la ricezione. Questo tipo di ricevitore fu il primo modello di apparecchio che consentiva la ricezione delle onde radiofoniche. La radio a galena rappresenta forse il simbolo di quell'epoca. Era detta anche la radio "dei poveri", perché dava a tutti la possibilità di ascoltare direttamente le voci e i suoni che venivano dal cielo, usando una semplice cuffia telefonica, un pezzo di filo per antenna e un rilevatore a "baffo di gatto". E non contenevano amplificatori alimentati da una fonte di energia. Infatti dovevano ricevere e conservare quanta più potenza elettrica possibile dall'antenna, convertendola in suono, mentre gli apparecchi comuni al giorno d'oggi, ma già quelli che hanno visto l'introduzione di dispositivi con tubi a vuoto, amplificano il debole contenuto energetico del segnale veicolato con le onde radio.

Il primissimo uso pratico della radio a galena era volto alla ricezione dei radiosegnali in codice Morse, trasmessi da pionieristici radioamatori con potenti trasmettitori a scintilla. La primordiale radio-telegrafia usava trasmettitori a scintilla e un essenziale modulatore, detto *Branley Coherer*, il quale veniva impiegato per rivelare la presenza (o l'assenza) del radio-segnale. Tuttavia, questi arcaici apparati non possedevano la sensibilità necessaria a convertire un segnale debole.

Intorno al 1906, con la scoperta che certi minerali metallici, come per l'appunto la galena, che potevano essere usati per rilevare il segnale, iniziarono a comparire i primi *crystal detectors*. Greenleaf Whittier Pickard, il 30 agosto 1906, richiese un brevetto per un *crystal detector* al

silicio, ottenendone la registrazione il successivo 20 novembre. Il modulatore di Pickard era rivoluzionario in quanto aveva scoperto che un sottile cavo appuntito detto "a baffo di gatto" messo anche leggermente in contatto con un minerale produceva il miglior effetto semiconduttivo.

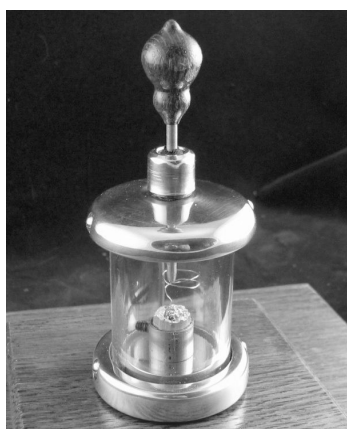


Figura 3.3: *crystal detector*

Un *crystal detector* (figura 3.3) comprendeva il cristallo, uno speciale cavo sottile che entrava in contatto con il cristallo ed il sostegno che manteneva i componenti al proprio posto. La galena era il tipo di cristallo più comunemente usato per lo scopo. Parecchi altri minerali sarebbero stati comunque analogamente adatti. Un altro vantaggio dei cristalli era il fatto che potevano demodulare i segnali AM. Questa forma di trasmissione era usata nei radiotelefoni e per trasmettere voce e musica per l'ascolto pubblico. I dispositivi a cristallo rappresentavano un metodo economico e tecnologicamente

semplice per ricevere questi segnali in un'epoca in cui l'industria radiofonica era allo stato embrionale.

Nel 1922 lo *U.S. Bureau of Standards* diffuse una pubblicazione intitolata *Construction and Operation of a Simple Homemade Radio Receiving Outfit*. L'articolo mostrava come praticamente ogni famiglia che comprendesse un individuo fornito di elementare abilità manuale poteva costruirsi una radio con cui ricevere informazioni sugli argomenti di attualità e cultura più disparati. Questo documento rappresenta una sorta di pietra miliare nell'avvicinamento agli apparecchi radio da parte di un'utenza generalizzata. L' NBC fece seguito lo stesso anno con una versione più raffinata, *Construction and Operation of a Two-Circuit Radio Receiving Equipment With Crystal Detector*, contemplante un apparecchio a due circuiti.

Tutto questo perché, al principio del XX secolo, le apparecchiature radio non erano alla portata economica del grande pubblico, per cui la gente interessata le costruiva utilizzando materiali di fortuna, anche singolari. Nel 1921 le radio prodotte industrialmente erano ancora assai costose. Se confrontate con il potere d'acquisto attuale del dollaro, alcune avrebbero avuto un prezzo intorno ai 2.000\$. Dato che le famiglie meno agiate non si sarebbero potute

permettere simili esborsi, la stampa pullulava di consigli su come costruirsi una radio a galena con materiali normalmente presenti nelle abitazioni. Per abbattere le spese, molti progetti suggerivano di avvolgere la bobina per la sintonia su contenitori vuoti come le scatole di cereali, che divennero un comune elemento costitutivo delle radio fatte in casa.

3.3 La distrazione del vuoto

La tecnologia a relè elettromeccanici aveva permesso la realizzazione di telefoni a commutazione e a composizione completamente automatici e le radio a microonde fornivano trasmissioni ad alta qualità in tutto il continente, riuscendo anche ad attraversare gli oceani, anche se con un servizio un po' "traballante". Erano in fase di progettazione e implementazione cavi sottomarini con ripetitori realizzati con tubi a vuoto, un sistema pensato per funzionare almeno 20 anni. Ancora una volta, la tecnologia disponibile appariva in grado di soddisfare le esigenze.

Tuttavia, persone come M. Kelly, allora presidente dei Bell Labs, professavano una certa cautela. I relè e le valvole stavano apparentemente rendendo possibili tutte le cose nella telefonia, ma Kelly aveva previsto che in alcuni anni la bassa velocità dei relè, la loro breve durata in termini di vita, unita all'alto consumo di energia dei tubi avrebbero finito per limitare ulteriori progressi nella telefonia ed altri settori elettronici. Egli non solo predisse il problema, ma aveva già adottato misure per trovare una soluzione. Nell'estate del 1945, Kelly aveva istituito un gruppo di ricerca presso i Bell Labs che doveva concentrarsi sul comprensione dei semiconduttori. Aveva anche un obbiettivo di lungo periodo, ossia creare un dispositivo a stato solido che avrebbe potuto in futuro sostituire le valvole termoioniche. Questa visione di Kelly ha innescato una delle più notevoli odissee tecniche nella storia del genere umano, un viaggio che sta proseguendo da oltre 60 anni.

I ricevitori radio non amplificati, la maggior parte dei quali erano presenti nelle radio a cristallo, erano l'unico modo per ricevere segnali radio durante la maggior parte dell'epoca della telegrafia senza fili. Tali dispositivi furono in gran parte sostituiti dai tubi a vuoto, invenzione datata 1906, anche se il costo dei ricevitori a tubo ha fatto sì che la sostituzione completa durasse diversi decenni. Con il 1920 le radio a cristallo erano già relegate ad un uso

da parte dei soli hobbisti.

Si ricorda tuttavia come nei primi anni del 1900 non esistesse alcun apparecchio con valvole termoioniche che potesse offrire una ricezione fedele e pulita come quella che si udiva in una cuffia collegata con un rilevatore a galena. Il diodo a baffo di gatto può essere considerato anche l'antesignano dei raddrizzatori a semiconduttore "a punta di contatto", che furono inventati dopo tre quarti di secolo nei Laboratori Bell. Con l'invenzione della valvola assistiamo ad una evoluzione nel mondo della radiofonia, poiché la qualità della ricezione migliorò notevolmente. La valvola termoionica (o tubo a vuoto) fu il primo componente elettronico "attivo" realizzato dall'uomo. Per "attivo" si intende un componente che, grazie ad una fonte esterna di energia, è in grado di innalzare la potenza di un segnale posto al suo ingresso. Si può affermare che l'invenzione della valvola risalga al 1883, anche se fu brevettata per la prima volta nel 1904 dall'ingegnere britannico Sir John Ambrose Fleming dell'University College di Londra. Bisognerà attendere le modifiche che un giovane ingegnere americano, Lee De Forest apporterà nel gennaio 1907 al progetto originale, per ottenere la prima valvola di uso universale. Le modifiche di Lee De Forest furono quelle che portarono alla realizzazione del triodo termoelettronico, che chiamò *audion*.

Il vero e proprio boom dell'allora giovane settore radio-telefonico, ebbe conseguenze dirette nello sviluppo dei dispositivi a vuoto, in quel momento ritenuti come il sentiero da seguire. Ma, da una parte lo studio di alcuni fisici e chimici rivolto alle proprietà elettromagnetiche di semiconduttori e metalli, e dall'altra i limiti che le valvole termoioniche presentavano, soprattutto in termini di frequenza di lavoro, tenevano vivo il mondo dei dispositivi a stato solido.

Lo sviluppo teorico della meccanica quantistica, a cavallo del 1920, ha svolto un ruolo importante nella guidare l'attenzione verso l'elettronica dello stato solido. Senza la meccanica quantistica non si avrebbe mai sviluppato una visione globale dei solidi. La comprensione delle differenze tra i metalli, isolanti e semiconduttori venne rapidamente sviluppata, ed il concetto di struttura a bande elettroniche, è stato la chiave di questa intuizione. Questi progressi nello sviluppo della teoria quantistica dei solidi vennero condotti principalmente da Peierls, Wilson, Mott, Franck, e altri ancora, in gran parte fisici e chimici che lavoravano in Inghilterra. Questi ricercatori hanno aggiunto molto alla comprensione della conducibilità nei

metalli, fornendo un quadro della loro struttura.

Il sodio metallico è il più semplice di tutti i metalli da un punto di vista elettronico, e per questo è stato spesso studiato in quel periodo. Una semplice teoria di Schottky ha portato a una grezza comprensione dei raddrizzatori nati dall'intuizione di Braun, ma, passando dalla teoria alla pratica, qualcosa non ha funzionato del tutto, probabilmente a luce del fatto che in quei giorni i semiconduttori erano ancora un puzzle.

Erano comunque continui gli sforzi spesi verso la scoperta di nuovi dispositivi che non presentassero i limiti delle valvole. Si ricorda su tutti Lilienfeld, il quale ha inventato il concetto di un transistor ad effetto di campo (FET). Egli credeva che l'applicazione di una tensione ad un materiale a scarsa conduzione avrebbe cambiato la sua conducibilità, permettendo quindi un'amplificazione. Ha brevettato questo concetto nel 1926, ma nessuno è stato in grado di utilizzarlo fino a molti anni dopo.

3.3.1 La predizione di Lilienfeld

L'8 Ottobre 1926, il 28 Marzo 1928 e l'8 Dicembre 1928 Lilienfeld presentò domanda per

ottenere tre distinti brevetti che sono stati concessi e depositati presso la United States Patent Office rispettivamente nel 1930, 1933 e 1932. Nell'interpretazione di questi, è d'aiuto il moderno sapere sulla teoria di base dei transistor sviluppata a partire dal 1947. Il transistor ad effetto-campo e diverse altre strutture di transistor sono stati descritti da Lilienfeld nei primi due brevetti e, più tardi (1935), nel brevetto di Heil. Per quanto riguarda la giunzione p-n ad effetto-campo e il transistor bipolare con iniezione di cariche minoritarie, che sono stati inventati e dimostrati

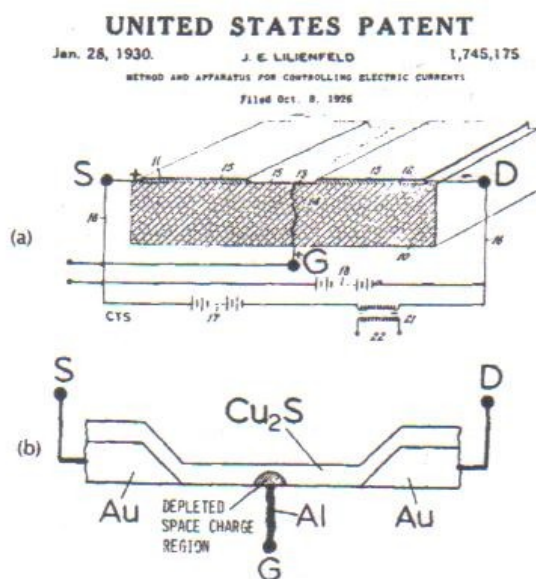


Figura 3.4 Brevetto del MESFET di Lilienfeld, ideato nel 1926; (a) struttura; (b) vista ingrandita della sua regione di canale

sperimentalmente da Bardeen, Brattain, Shockley e dai loro colleghi presso i Laboratori Bell Telephone, si deve attendere gli anni dal 1947 al 1952.

Nei lavori di Lilienfeld compaiono cinque strutture diverse di quelli che si possono definire primitivi transistor. Tuttavia, non ci sono prove se uno qualsiasi di questi dispositivi da lui proposti siano stati costruiti oppure, se realizzati, abbiano lavorato come previsto.

Il primo brevetto di Lilienfeld realizzava una struttura MESFET (*Metal / Semiconductor FET*). Due disegni tratti dal brevetto originale vengono proposti nella figura 3.4, con l'aggiunta dei simboli di Gate, Source e Drain per meglio confrontarli con le moderne strutture di MOSFET; la figura (a) mostra la struttura del MESFET immaginato da Lilienfeld, mentre in (b) viene data una vista ingrandita della sua regione di canale.

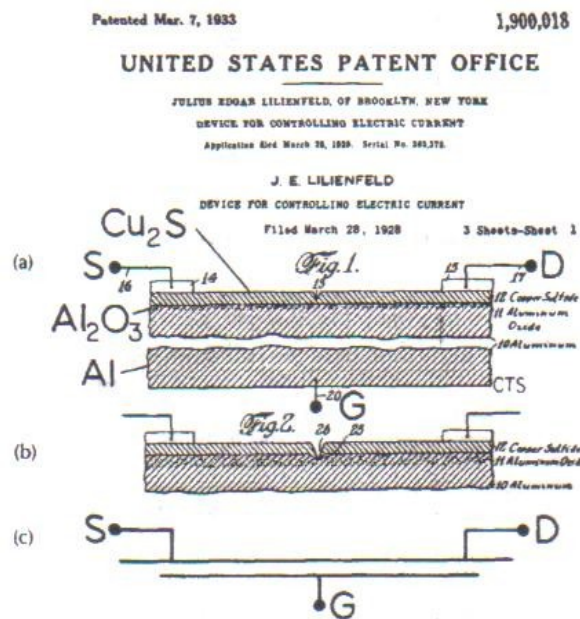


Figura 3.5: Brevetto del 1928 di Lilienfeld, l'idea di MOSFET; (a) e (b) struttura del dispositivo immaginato da Lilienfeld; (c) simbolo del moderno MOSFET

Il secondo brevetto riportava due strutture di transistor, che sono riconducibili al MOSFET ed al CMSR (*Gated Metal/ Semiconductor Rectifier Transistor* o *CMSRT*). Nelle raffigurazioni (a) e (b) della figura 3.5 viene mostrata la struttura che il fisico tedesco intendeva realizzare. In (c) il simbolo attuale del MOSFET.

Infine con il terzo brevetto venivano certificate altri due strutture, il *Metal-Base Transistor* o

Semiconductor-Metall-Semiconductor Transistor (SMST), e il *Schottky-Barrier-Emitter / Schottky-Barrier-Collector Transistor* o *Metal-Semiconductor-Metal Transistor (MSMT)*. Questi due transistor non operavano sulla modulazione di conducibilità o sul principio di effetto-campo come quelli dei primi due brevetti.

Negli schemi circuitali forniti dal fisico tedesco, si trovavano anche le tensioni di polarizzazione diretta con il corretto verso di orientamento per un ottimale funzionamento da amplificatore. I brevetti descrivevano in dettaglio i metodi per ottenere il transistor con una struttura a film sottile, oltre a riportare le esperienze dirette dell'inventore su come le caratteristiche di tale struttura variavano a seconda delle diverse condizioni di fabbricazione, come pure l'andamento del modulo del breakdown di tensione e la bontà dei contatti ohmici.

Il solfuro di rame era indicato come il “composto” o film semiconduttore nel primo brevetto, brevetto che menzionava anche due metodi per la deposizione del film di rame (per evaporazione termica nel vuoto o per deposizione di una sospensione colloidale) e solfitazione del film (in vapori di zolfo o in bisolfuro di carbonio liquido). Nel primo brevetto, che realizzava il MESFET, il gate di $2,5\ \mu\text{m}$ era, molto ingegnosamente, realizzato dallo schiacciamento di un foglio di alluminio tra due bordi di una piccola lastrina di vetro su cui il film di rame veniva poi depositato e solforato. Solfuro di rame, ossido di rame, e di ossido di piombo erano specificamente menzionati nel secondo brevetto come possibili candidati per il composto del film a semiconduttori, attraverso solforazione o ossidazione.

Nel secondo brevetto, Lilienfeld dava anche le espressioni chimiche dei possibili composti da utilizzare. Senza saperlo, aveva introdotto quelli che diversi anni dopo vennero riconosciuti come semiconduttori di tipo-p e semiconduttori di tipo-n. Lilienfeld non poteva ancora utilizzare questi concetti, e questo gli impediva lo sviluppo della fisica di base dei suoi transistor. Concetti che non furono utilizzati probabilmente perché erano appena stati messi a punto da A. H. Wilson nel 1931. Comunque capiva bene un concetto chiave, la modulazione di conducibilità attraverso un campo elettrico trasversale, che ha usato ripetutamente per descrivere l'amplificazione dei segnali nei transistor brevettati. Egli utilizza questo concetto per spiegare il funzionamento di entrambi i MESFET nel primo brevetto e del MOSFET nel secondo brevetto. Inoltre, egli sapeva bene dove collocare le giunzioni rettificanti e le giunzioni ohmiche per collegarsi ai circuiti esterni.

Nel Marzo 1935 una richiesta di brevetto presentata al British Patent Office da Oskar Heil, nativo della Germania, fornisce la prima descrizione del funzionamento del MOSFET usando i nuovi concetti di semiconduttori legati ad elettroni e lacune, ovvero tipo-p e tipo-n. I dispositivi descritti da Heil erano costituiti da un lungo film sottile di semiconduttore, le cui due estremità sono coperte da una striscia di metallo (che serviva per i contatti di drain e source). Avevano anche un elettrodo in metallo (il gate) sovrapposto e isolato rispetto al film semiconduttore e alle strisce di metallo, il quale permetteva di modulare la conduttanza del film. Tale dispositivo *Metal /n-film/ Metal* utilizzava una struttura di tipo-n del semiconduttore, come nel moderno MOSFET a svuotamento, e come pure descriveva Lilienfeld con la sua configurazione $Au/p-Cu_2/Au$.

In maniera del tutto analoga Heil descriveva la struttura *Metal /p-film/ Metal*, con un film semiconduttore di tipo-p, ovvero il moderno MOSFET ad arricchimento. Tuttavia, nemmeno Heil sapeva spiegare come il suo M/p/M fosse in grado di lavorare. L'idea del canale di inversione sarebbe stata riconosciuta per la prima volta solo nel 1947 da Bardeen. Questa ha portato all'invenzione del transistor ad effetto-campo a punta di contatto realizzato da Bardeen e Brattain nel 1948, predecessore del transistor bipolare e del moderno MOSFET con la diffusione di source e drain.

Curioso è ciò che sembra aver motivato Lilienfeld e gli ha fornito la spinta che lo ha portato a realizzare così tante strutture di transistor. Infatti pare che le sue precedenti ricerche fossero rivolte all'emissione di elettroni nel vuoto, ricerche che vennero anche pubblicate nel 1920 in un giornale dell'Università di Lipsia. Queste scoperte e la sua esperienza maturata negli anni nel campo dell'elettronica a valvole devono averlo portato a inventare i dispositivi a stato solido. Come lui, sulla base di conoscenze precedenti legate ai tubi a vuoto, stessa strada è stata presa da Bardeen, Brattain e Shockley. Di certo vale quando detto da Shockley ricevendo il premio Nobel *"accidents (inventions) favor the prepared mind"* (gli incidenti -invenzioni- favoriscono la mente preparata).

Capitolo 4 - Il Transistor

Il primo prototipo funzionante di transistor, nome che deriva dalla contrazione delle parole *transfer-resistor*, fu realizzato nel 1947 da tre ricercatori dei laboratori Bell: John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley. Nel 1956 i tre ricercatori furono insigniti del premio Nobel per la Fisica con la motivazione «per le ricerche sui semiconduttori e per la scoperta dell'effetto transistor». Già verso la fine degli anni '50 la produzione di transistor si orientò verso l'utilizzo del silicio come elemento semiconduttore e negli anni '70 il transistor al germanio divenne obsoleto.

4.1 Dispositivi a stato solido, una strada obbligata

Già alla fine degli anni trenta cominciava ad essere ammesso che ci potevano essere opportunità di creare una qualche forma di dispositivo a stato solido. In quel periodo un uomo di nome Mervin Kelly, presso i Bell Labs, decise, nel 1936, che avrebbe dovuto avviare un gruppo di lavoro per sviluppare un dispositivo a stato solido. Sfidò un certo numero di persone, come Bill Shockley, Russell Ohl, Jack Scaff e altri ancora, ad iniziare a lavorare su un primo prototipo e poi realizzarlo. Kelly aveva la sensazione che il tubo vuoto non sarebbe stata la risposta definitiva all'elettronica. La sua affidabilità e le dimensioni erano tali che qualcosa doveva essere fatto, oltre a rendere più efficiente e più piccoli i tubi a vuoto. Nel 1938, due tedeschi, Pohl e Hilsch, descrissero un amplificatore a stato solido realizzato con l'uso del bromuro di potassio, fornito di tre terminali metallici. Tuttavia, questo dispositivo aveva una frequenza di funzionamento troppo bassa e non avrebbe comunque potuto essere utilizzato in qualsiasi campo dell'elettronica. Interessante è che un tale dispositivo sia arrivato nello stesso

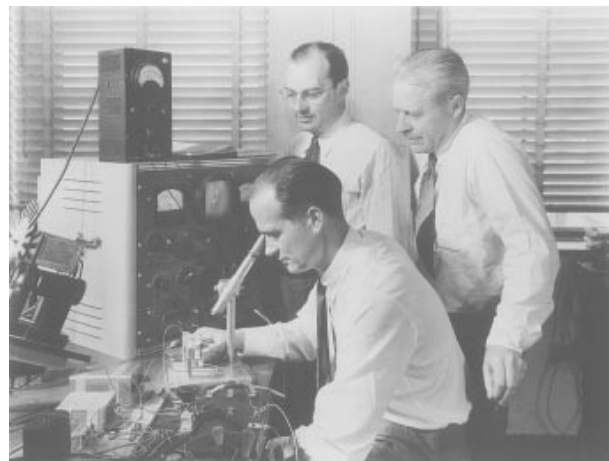


Figura 4.1: John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley scoprono l'effetto transistor presso i Laboratori Bell, nel dicembre 1947

momento in cui Kelly creava il “gruppo dello stato solido”, dimostrando che altri ingegneri la pensavano allo stesso modo.

4.1.1 Storia del transfer resistor

Nel dicembre del 1947 fu realizzato un dispositivo nel quale due sonde di filo d'oro poste l'una vicino all'altra erano pressate sulla superficie di un cristallo di Germanio. Esaminandolo in funzione, si poteva osservare che la tensione di uscita alla sonda detta “collettore”, rispetto alla base di Germanio, era maggiore della tensione di entrata alla sonda chiamata “emettitore”. Brattain e Bardeen si resero conto che questo era l'effetto che avevano sperato di trovare e che era nato (l'invenzione fu annunciata durante una conferenza stampa il 30 giugno 1948 e fu relegata nelle ultime pagine dei pochi giornali che riportarono la notizia) l'amplificatore a stato solido nella forma del transistor a punto di contatto (fu J.R. Pierce , in seguito direttore dei primi progetti di comunicazione via satellite , a coniare il termine “transistor” come contrazione di “*transfer* “ e “*resistor*“). Le prestazioni dei primi transistor erano molto scarse; essi avevano un guadagno e un'ampiezza di banda bassi, erano rumorosi e le loro caratteristiche variavano molto da dispositivo a dispositivo. Schockley, il capo gruppo, capì che le difficoltà nascevano dai punti di contatto. Egli propose allora un diverso dispositivo, il transistor a giunzione, e sviluppò quasi immediatamente la teoria del suo funzionamento. I nuovi dispositivi facevano affidamento su portatori di carica di entrambe le polarità (si trattava quindi di dispositivi bipolari); i due portatori erano i famosi elettroni e altre “particelle strane”. L'esistenza di queste particelle strane si poteva spiegare solo con la meccanica quantistica; inoltre si comportavano come se avessero carica positiva. Esse vennero chiamate “lacune” poiché rappresentavano zone del cristallo in cui mancavano gli elettroni. La teoria di Schockley prevedeva che si potessero raggiungere densità di corrente elevate applicando piccoli potenziali.

Con l'interesse sempre crescente riguardo ai semiconduttori, si poteva affermare ormai tranquillamente che le proprietà elettriche dei transistor si basavano su un contenuto specifico di impurezze attentamente controllate (circa un atomo di impurezza per 100 milioni di atomi di Germanio). Di conseguenza , non si potevano costruire dispositivi affidabili se non avendo a disposizione cristalli eccezionalmente puri a cui aggiungere le necessarie impurezze.

Teal, nei laboratori Bell, nel 1950 realizzò la crescita di monocristalli di Germanio avente un contenuto di impurezze minore di una parte su un miliardo. Questo risultato portò alla fabbricazione dei primi transistor a giunzione di lega. Così, tre anni dopo la scoperta dell'amplificazione in un solido, i transistori fecero il loro ingresso sul mercato.

L'American Telephone and Telegraph (AT&T) , di cui i laboratori Bell erano il ramo di ricerca, prese la decisione importantissima di non tenere segrete queste scoperte. I membri del suo staff tecnico si impegnarono in simposi per condividere le loro conoscenze con professori (i quali a loro volta resero partecipi gli studenti) e ingegneri e scienziati di altre aziende. Vennero offerti brevetti a qualunque azienda interessata alla produzione industriale dei transistor. Le aziende che producevano i tubi a vuoto , quali RCA, Raytheon, General Electric, Westinghouse e Western Electric (il ramo industriale della AT&T), furono le prime a fabbricare transistor. Altre aziende esistenti e di nuova formazione che compresero il potenziale di questi dispositivi presto iniziarono a produrli.

Una di queste aziende, la Texas Instruments , nel suo nuovo laboratorio per i dispositivi a stato solido, al capo del quale era Teal , nel 1954 cominciò a produrre transistor a silicio. Il silicio consentiva il funzionamento fino alla temperatura di 200°C (contro il Ge che si fermava a 75°C); oggi la maggioranza schiacciante dei dispositivi a semiconduttore è fabbricata in silicio.

A Bardeen, Brattain e Schickley fu assegnato il premio Nobel per la fisica nel 1956 per l'invenzione del transistor e per il loro contributo alla comprensione dei semiconduttori. Questo è stato il primo premio Nobel assegnato per un dispositivo ingegneristico.

4.1.2 La scoperta della giunzione p-n

Per individuare uno momento chiave nella virata verso i dispositivi a stato solido, bisogna però tornare un po' indietro, precisamente nel 1940, anno in cui Russell Ohl stava facendo un grande lavoro, insieme con gli altri presso i Bell Labs, nel tentativo di capire i cristalli di silicio. Ohl aveva scoperto che a seconda di come venivano preparati i singoli cristalli di silicio, si poteva ottenere un silicio di tipo-p oppure di tipo-n. Che cosa si intendesse per tipo-p o tipo-n in quei giorni significava ottenere un raddrizzatore positivo o negativo. La

notazione n o p deriva proprio da questo, ossia dalla direzione che assumeva la rettifica. Un po' di tempo dopo, Ohl è stato in grado di creare un campione di silicio in cui la parte superiore era una regione di tipo-p e il fondo era di tipo-n, e scoprì che quando era esposto alla luce, era anche in grado di sviluppare una tensione. Quando Ohl portò i suoi risultati al management dei Bell Labs, Kelly rimase abbastanza scettico, il quale decise allora di affidare a Brattain, orgoglioso di essere stato chiamato in causa, una verifica dettagliata del lavoro svolto dal collega.

É divertente come i fisici abbiano capito il tipo di impurità che stava causando la differenza tra silicio di tipo-n e quello di tipo-p. Si dice che, mentre Jack Scaff e H.C. Theuerer stavano tagliando un wafer di silicio di tipo-n, i due abbiano sentito l'odore del fosfato come se stessero tagliato tale materiale. E così hanno dedotto che devano essere presenti impurità di fosforo, il che aveva senso, considerando che il fosforo ha l'elettrone in più. Ciò dimostrava come i materiali fossero individuati prima della Seconda Guerra Mondiale.

Durante la guerra, inevitabilmente, ci fu uno sviluppo nei settori tecnologici più influenzati dal lavoro sui radar, producendo un desiderio molto forte di perfezionare i raddrizzatori a stato solido, ovvero ci si concentrò maggiormente sullo studio di materiali come silicio e germanio.

I primi radar, sviluppati nei laboratori del Massachusetts Institute of Technology (MIT) da Lee DuBridge, lavoravano a frequenze relativamente basse. Fu presto evidente che per ottenere il tipo di risoluzione desiderata era necessaria una frequenza più alta o una più corta lunghezza d'onda, spingendo gli sviluppatori a guardare verso la regione dei giga-hertz, andando nella direzione di rilevatori a stato solido. In quel periodo venne svolto un sacco di lavoro su dispositivi del genere, per lo più prove ed errori, che, tuttavia, restituirono un importante contributo per la comprensione dei semiconduttori.

4.1.3 L'invenzione del transistor a contatto puntiforme

In quel periodo si susseguirono un discreto numero di esperimenti, dando tutti esiti negativi. Bardeen propose che quegli esperimenti non riuscivano perché il campo elettrico non penetrava il corpo del materiale semiconduttore, che invece era bloccato da cariche

immobili intrappolate nello strato superficie del semiconduttore.

Insieme a Brattain, i due fisici cercarono di confermare questa teoria sperimentando con sonde di metallo la superficie del germanio. La teoria sembra essere corretta. Così, per la prima volta, ci fu una certa conoscenza del perché dei tanti tentativi falliti nell'osservare l'effetto-campo, e la possibilità di intervenire.



Figura 4.2: Il transistor a contatto puntiforme

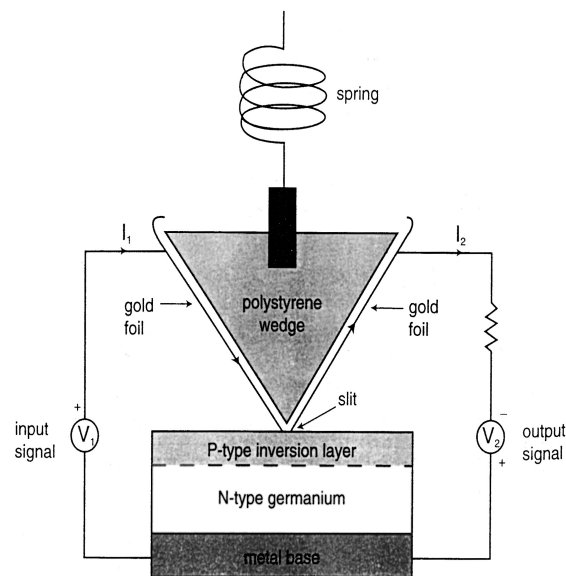


Figura 4.3: rappresentazione schematica del transistor a contatto puntiforme

Nel corso del loro lavoro, cercarono di modificare gli stati di superficie con degli elettroliti applicati alla superficie di germanio. Seguendo il consiglio di Gibney, trovarono che con l'applicazione di una tensione attraverso l'elettrodo, si creavano grandi cambiamenti nel flusso di corrente per mezzo di un contatto polarizzato inversamente. Brattain successivamente sostituì l'elettrodo con una punta d'oro evaporato, in una regione adiacente al contatto puntiforme. Infine, sostituendo entrambi i contatti con due strisce di lamina d'oro separate da solo pochi millimetri, una geniale soluzione, e tenendole premute sulla superficie del germanio, con un contatto polarizzato direttamente e l'altro inversamente, riuscirono ad osservare un guadagno di potenza. Era stato scoperto l'effetto transistor. Era il 16 dicembre 1947, soli due anni e mezzo anni dopo la formazione del gruppo di lavoro da parte di Shockley. Una settimana dopo, il 23 dicembre 1947, il dispositivo è stato mostrato ufficialmente ai dirigenti dei Bell Labs, con un circuito di prova (figure 4.2 e 4.3).

4.2 L'alternativa di Shockley

Durante le settimane che seguirono l'invenzione del transistor a contatto puntiforme, Shockley era tormentato da emozioni contrastanti. Anche se ha riconosciuto che l'invenzione di Bardeen e Brattain era stata un magnifico regalo di Natale per i Bell Labs quell'anno, era dispiaciuto di non aver avuto un ruolo diretto nel concepimento di quella svolta fondamentale nel mondo dell'elettronica e non solo. Dopo il fallimento della sua idea di effetto-campo più di due anni prima, Shockley aveva pagato il passaggio della sua attenzione alla ricerca sui semiconduttori. Durante i mesi prima dell'invenzione, aveva lavorato principalmente sulla teoria delle dislocazioni nei solidi. Aveva, però, pensato alla fisica delle giunzioni p-n ed il loro uso in dispositivi pratici. La scoperta di Brattain e Gibney nel novembre 1947, aveva stimolato la riflessione di Shockley. Pochi giorni dopo, infatti, egli ha suggerito la fabbricazione di un amplificatore con una goccia di elettrolita depositato in una giunzione p-n in silicio o germanio; questo approccio ha funzionato quando Brattain e Pearson provarono a realizzarlo. Era l'8 Dicembre 1947, quindi il transistor a giunzione vedeva la luce più di una settimana prima della nascita del transistor a contatto puntiforme. Shockley descriveva sul suo taccuino di laboratorio un'idea per un transistor “sandwich” n-p-n, che aveva corrente che scorreva lateralmente all'interno di uno strato-p e con due strati-n intorno ad esso in qualità di elettrodi di controllo. L'invenzione del transistor a contatto puntiforme e successivamente l'interpretazione di Bardeen della suo funzionamento in termini del flusso di lacune, spinsero Shockley all'azione. Infatti, l'analogia del pensiero di Bardeen con il funzionamento di un tubo a vuoto, in cui i portatori di carica erano le lacune invece degli elettroni, era attribuibile a Shockley, che ne descriveva il principio nei suoi appunti in una stanza del Bismarck Hotel di Chicago la vigilia di San Silvestro del 1947, nel suo primo tentativo di realizzare un transistor a giunzione.

In questo primo approccio ad un transistor a giunzione, si può vedere chiaramente la somiglianza con un tubo a vuoto. Il suo elettrodo di controllo (*control*) agisce come una griglia per controllare il flusso delle lacune da una fonte (*source*) ad una base (*plate*). Poco più di tre settimane più tardi, questa volta lavorando presso la sua abitazione, la mattina del 23 gennaio 1948, Shockley aveva ideato un altro prototipo in cui uno strato di tipo-n ed uno di tipo-p venivano invertiti e gli elettroni, piuttosto che le lacune, erano i portatori di corrente.

Spiegava come applicando una tensione positiva allo strato-p interno, il suo potenziale si avrebbe dovuto abbassare, con un conseguente aumento esponenziale del flusso di elettroni oltre la barriera. Shockley aveva osservato che le cariche minoritarie, in questo caso gli elettroni, dovevano fluire in presenza di una dominanza di cariche maggioritarie, ovvero le lacune dello strato-p. Dovette passare più di un mese prima che rivelasse la sua idea, forse per timore che qualcun altro la sfruttasse per inventare un nuovo dispositivo prima di lui.

Per funzionare, il dispositivo n-p-n di Shockley richiedeva una conoscenza di fisica superiore a quella che ha portato alla realizzazione del transistor a punta di contatto, fondamentale per capire che le cariche minoritarie erano in grado di diffondersi attraverso lo strato di base in presenza di cariche maggioritarie. Bardeen aveva le conoscenze necessarie, ma al tempo lui e Brattain si stavano preoccupando di preparare i documenti per il brevetto del loro dispositivo a contatto puntiforme. Tuttavia le prove per la diffusione richiesta delle cariche minoritarie nel substrato non tardarono ad arrivare. In un incontro riservato ai Bell Labs, il 18 febbraio 1948, il fisico John Shive rivelò che aveva appena sperimentato con successo un transistor a contatto puntiforme a doppia parete, realizzato utilizzando uno strato molto sottile di germanio di tipo-n, ma con l'emettitore e il collettore collegati a questo sulla superficie opposta.

4.2.1 Il Bipolar Junction Transistor

In una struttura come quella descritta da Shive, le lacune dovevano fluire per diffusione in presenza delle cariche maggioritarie, ovvero gli elettroni nel germanio di tipo-n, attraverso il substrato (*bulk*) del semiconduttore. Questi non erano confinati nello strato di inversione sulla superficie, come Bardeen e Brattain sostenevano. Il 26 Febbraio vennero richiesti quattro brevetti per amplificatori a semiconduttore, compresa la domanda di Bardeen e Brattain per il transistor a contatto puntiforme. Circa quattro mesi dopo venne depositato il brevetto di Shockley sul transistor a giunzione (26 giugno), e il 30 giugno venne annunciata l'invenzione del transistor in una conferenza stampa. Nel luglio 1948 Shockley riusciva a dimostrare che l'iniezione di cariche minoritarie si verificano nel germanio di tipo-n.

L'8 Dicembre 1948 dello stesso anno fu sempre Shockley che, sul suo dispositivo, osservò un guadagno di tensione di valore 2. Fu spontaneo per lui dichiarare che quello che aveva

realizzato era probabilmente il primo e solo transistor che era in grado di amplificare da quando ne aveva depositato il brevetto (brevetto per il *bipolar junction transistor BJT*), il 26 Giugno 1948, ovvero una sola settimana prima dell'annuncio pubblico dell'invenzione del transistor a contatto puntiforme da parte di Brattain e Bardeen.

Il transistor a giunzione presentava una diversa struttura rispetto a quello di Bardeen-Brattain a punta di contatto. Era costituito da due elettrodi a contatto puntiforme ravvicinati, fatti di fili di bronzo fosforoso.

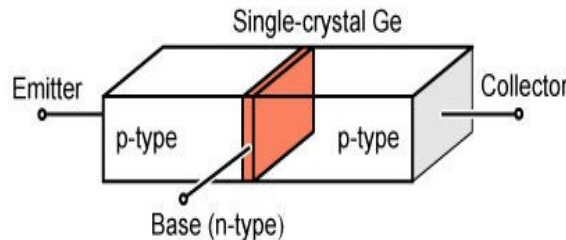


Figura 4.4: Struttura del transistor bipolare

Questi elettrodi venivano collegati ad uno strato di superficie di inversione di tipo-p disposto su germanio di tipo-n, attraverso un film sottile di ossido. In precedenza (intorno al 17 novembre 1947), era stato Brattain a fare altri esperimenti sugli stati di superficie e la modulazione della conducibilità, utilizzando i due contatti di punto su Germanio di tipo-n. Esperimenti che hanno condotto Shockley all'invenzione e alla prova sperimentale del transistor a giunzione bipolare.

Si ricordano allora tre date fondamentali per il BJT:

- 23 Gennaio 1948, l'iniezione di cariche minoritarie e l'idea di struttura del transistor a giunzione proposta da Shockley;
- 18 Febbraio 1948, la dimostrazione sperimentale del transistor bipolare, fatta da Shive, utilizzando un transistor a contatto puntiforme a doppia parete di Germanio, che aveva l'emettitore e il collettore collegati sulla superficie opposta di un sottile film di Germanio tipo-n ;
- 17 Giugno 1948, Bardeen e Brattain spiegano il funzionamento del transistor bipolare a contatto puntiforme in un brevetto (figura 4.4).

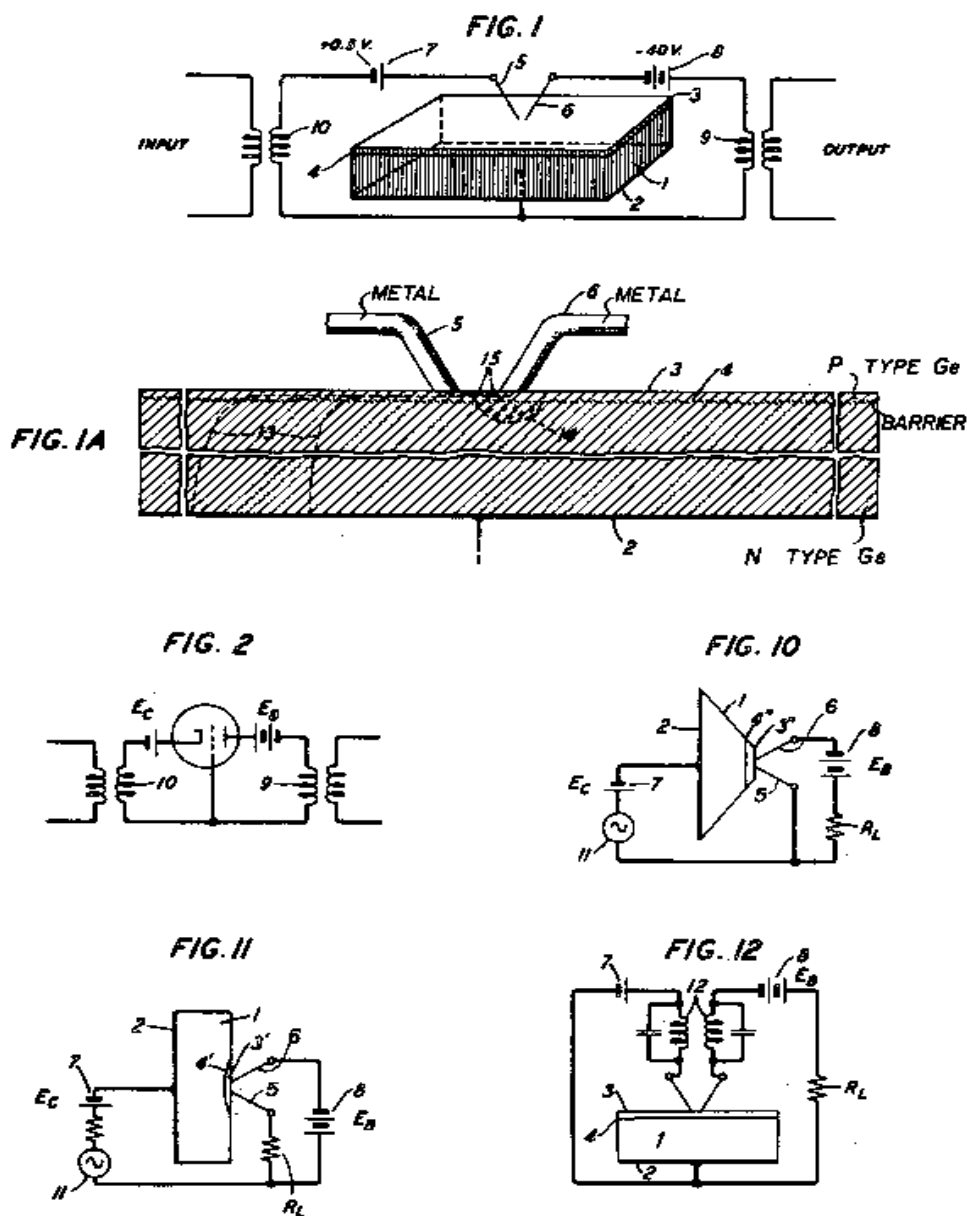
Oct. 3, 1950

J. BARDEEN ET AL
THREE-ELECTRODE CIRCUIT ELEMENT UTILIZING
SEMICONDUCTIVE MATERIALS

2,524,035

Filed June 17, 1948

3 Sheets-Sheet 1



INVENTORS: J. BARDEEN
W. H. BRATTAIN
BY *Harry C. Hart*
ATTORNEY

Figura 4.5: Parte del brevetto del 17 Giugno 1948 dove Bardeen e Brattain spiegano il funzionamento del transistor bipolare a contatto puntiforme

Le caratteristiche principali dell'invenzione del transistor bipolare possono essere quindi riassunte nella scoperta della dipendenza esponenziale della corrente dovuta alle cariche minoritarie iniettate rispetto alla tensione della giunzione di emettitore e l'individuazione dell'alta impedenza della giunzione di collettore.

4.3 Tra bipolare ed unipolare

Nel periodo di esplosione degli esperimenti su transistor a giunzione, rimaneva pur sempre vivo l'interesse nel realizzare un transistor che si basasse sull'effetto-campo. Dei tentativi in questo senso, che prevedevano l'utilizzo di un film sottile, sono stati riportati in dettaglio da Shockley e Pearson nel 1948 dopo le prove iniziali del 1945. Avevano osservato la modulazione della conducibilità sul germanio di tipo-p, ossido rameoso (Cu_2O) di tipo-p e silicio di tipo-n. Tuttavia, la modulazione di conducibilità che misurarono era mille volte più piccola del previsto. Attribuirono questa carenza alla cattura delle cariche modulate da parte degli stati superficiali secondo la teoria sviluppata da Bardeen, poiché la scarsa mobilità del film non poteva spiegare una così bassa modulazione della conducibilità. Ma come si diceva, l'attenzione, in quel periodo, rimaneva centrata sui transistor a giunzione.

Il successivo passo in avanti, dopo l'annuncio dell'invenzione del primo dispositivo, arriva per merito di G. K. Teal e J. B. Little che riuscirono a far crescere un singolo cristallo di germanio estraendolo lentamente da una colata di germanio di elevata purezza. Utilizzando tale materiale, è stato finalmente possibile scoprire e caratterizzare i portatori minoritari iniettati attraverso i contatti metallici nei filamenti di germanio. Vari esperimenti di Haynes, Pearson, Suhl, e Shockley confermarono il comportamento di entrambi i tipi di portatori minoritari e hanno permesso di misurarne l'efficienza di iniezione, la mobilità, i coefficienti di diffusione, e l'affidabilità. Questi risultati hanno dimostrato che, in accordo con la teoria del transistor a giunzione di Shockley, era possibile realizzare un nuovo dispositivo funzionante. Questo richiedeva un ulteriore affinamento delle tecniche di crescita dei cristalli e soprattutto del controllo del drogaggio.

Nel mese di aprile del 1950, un team formato da Shockley, M. Sparks, e Teal riuscì a crescere un cristallo che conteneva una sottile regione di tipo-p incorporato in un materiale di tipo-n. Il

cristallo è stato tagliato in barre n-p-n a cui vennero applicati dei contatti. Le proprietà elettriche del dispositivo risultante erano in gran parte coerenti con la teoria di Shockley. In quel momento, l'elettronica dei transistor iniziava ad avere un solido fondamento.

Ci fu un altro evento che ha completato questa fase nella saga dei transistor, ossia la pubblicazione nel 1950 del libro di Shockley *“Electrons and Holes in Semiconductors”*. Fu un ottimo mezzo, e forse l'unico, utilizzato da scienziati e ingegneri per arrivare ad un rapido sviluppo della tecnologia. Così, in un periodo di soli cinque anni dalla istituzione del gruppo dei semiconduttori nei Bell Labs, l'invenzione del transistor era essenzialmente completa, compresa e documentata. La fase scientifica stava volgendo al termine.

Le attività connesse al transistor iniziarono a crescere rapidamente. Sempre nei Bell Labs, Gordon Teal riuscì ad adattare al germanio il metodo Czochralski per la crescita di cristalli singoli da un fuso. Questi cristalli, quasi perfetti, venivano purificati durante il processo di crescita, e in poco tempo vennero utilizzati per tutti i transistor. Nel frattempo Shockley sviluppava una elegante teoria delle proprietà elettroniche di un giunzione p-n in un cristallo continuo di germanio o silicio. La sua estensione della teoria della giunzione p-n prevedeva che due giunzioni parallele molto vicine tra loro in un cristallo e con tipi diversi di conducibilità alternate, ad esempio una giunzione n-p-n, potevano costituire una nuova struttura di transistor. L'effetto transistor sarebbe avvenuto interamente all'interno del cristallo. Dopo alcuni tentativi, seguiti da rettifiche, cristalli con una sezione n-p-n vennero prodotti con una dimensione adeguatamente sottile.

4.3.1 I problemi di produzione

Nei primi mesi del 1951, c'erano due strutture di transistor che erano in grado di funzionare, ma nessuna delle due era adatta per una fabbricazione su larga scala. Il transistor a contatto puntiforme sembrava aver ereditato tutte le fragilità del *cat's whisker*. Era difficile da realizzare, e le sue caratteristiche elettriche erano tutt'altro che ideali, molto variabili, difficile da controllare, e intrinsecamente instabili. Ciononostante sono stati prodotti per dieci anni, a partire dal 1951, dalla Western Electric, divisione della AT & T, e hanno trovato applicazione su telefoni, oscillatori, apparecchi acustici ed il primo computer di bordo digitale.

Dall'altra parte c'era il transistor a giunzione che, come prevedibile, aveva caratteristiche elettriche più attraenti. Tuttavia, è stato prodigo nell'uso di semiconduttori preziosi e richiedeva difficili tecniche per realizzare i contatti. I cristalli venivano cresciuti utilizzando una procedura precisa di drogaggio per creare un singolo strato sottile di materiale base inserito tra il materiale usato come emettitore e come collettore, di tipo opposto. Il processo era laborioso e non consentiva facilmente un'automazione.

Entrarono così in scena altri dispositivi, come il transistor a giunzione cresciuta (*grown junction transistor*) fabbricato a partire dal 1952. Sempre nello stesso anno, J. E. Saby alla General Electric annunciava lo sviluppo del transistor a giunzione di lega (*alloy junction transistor*), la cui versione originale è stata fatta saldando punti di indio (un materiale accettore) sui lati opposti di fettine sottili di germanio tipo-n. Il punto di partenza era la crescita in maniera uniforme di cristalli drogati che erano relativamente facili da produrre e che poi venivano tagliati per essere utilizzati. Le matrici per i punti di indio potevano essere posizionate come griglie su entrambi i lati delle fette di cristallo tagliate e, dopo la fusione, le fette potevano essere tagliate a quadratini, ottenendo un grande numero di singoli transistor. I contatti invece erano facili da applicare. Un tale dispositivo aveva delle buone caratteristiche e prestazioni, faceva un uso efficiente dei semiconduttori, e poteva essere prodotto con un certo grado di automazione. Fu infatti il primo transistor ad essere facilmente lavorato e per alcuni anni è stato il pilastro del settore. Uno svantaggio era che si richiedeva il controllo preciso delle dimensioni e delle temperature di fusione per poter creare strati base abbastanza sottili con lo scopo di ottenere prestazioni ad alta frequenza.

L'emergere del processo di giunzione di lega (*the alloy junction process*) ha avuto un sottoprodotto interessante. Venne usato per fabbricare il primo transistor a effetto-campo funzionante. Nel 1951, Shockley aveva reinventato il transistor ad effetto-campo, ma questa volta come un dispositivo a giunzione. Egli ha proposto di utilizzare la regione di carica spaziale di una giunzione polarizzata inversamente per restringere l'area di un materiale semiconduttore nella quale le cariche maggioritarie potevano fluire. La sua analisi ha mostrato che un tale dispositivo poteva produrre un guadagno di potenza. Poiché il funzionamento del dispositivo coinvolgeva solo i portatori maggioritari, lo definì come "transistor unipolare" per distinguerlo dal transistor bipolare che coinvolgeva entrambi le cariche.

Nel 1952, Shockley chiese a G.C. Dacey e I.M. Ross di cercare di costruire un transistor unipolare a effetto-campo. I due scelsero di evitare la complicazione non necessaria di costruire una struttura a griglia, come era stato inizialmente ipotizzato da Shockley, e realizzare invece la regione di “gate” in lega di indio posta sulle superfici di un filamento di tipo-n. Questa struttura si comportava a tutti gli effetti secondo la teoria di Shockley. Tuttavia a quel tempo, non migliorava in modo significativo le prestazioni teoriche rispetto al transistor bipolare, che era anche più facile da fabbricare. Così, la teoria di effetto-campo era stata convalidata, ma il transistor se ne tornava nel dimenticatoio, almeno per un po'.

4.3.2 La ricerca del silicio

Si è capito fin dall'inizio che il silicio sarebbe stato un materiale migliore rispetto al germanio per realizzare la maggior parte delle applicazioni a transistor. Questo deriva essenzialmente dalla maggiore energy gap del silicio (1.1 eV), rispetto al germanio (0,67 eV). Nel germanio a temperatura ambiente, un numero considerevole di elettroni poteva penetrare l'energy gap ed entrare nella banda di conduzione. La corrente inversa nelle giunzioni p-n in germanio era quindi notevole ed aumentava rapidamente con la temperatura. La corrente inversa utilizzando il silicio risultava invece di alcuni ordini di grandezza più piccola. Quindi, una giunzione di silicio polarizzato inversamente approssimava meglio un circuito aperto e lo rendeva più adatto per le operazioni di commutazione. Le giunzioni di silicio, inoltre, mantenevano le loro proprietà a temperature molto superiori di quelle in germanio, il che implica una capacità di gestire una maggiore potenza.

Non sono mancati alcuni svantaggi, anche se minori del previsto, nel scegliere il silicio. L'elevato energy gap significava anche che la polarizzazione diretta necessaria per creare un flusso significativo di corrente doveva essere superiore. Questo portava ad una tensione minima di funzionamento superiore nei circuiti al silicio e richiedono più potenza di funzionamento. Il silicio presentava anche una minore mobilità delle cariche minoritarie, di circa un fattore tre rispetto al germanio. Ciò riduceva la velocità delle cariche, ponendo un limite inferiore alla velocità di funzionamento. In pratica poi, questo inconveniente veniva alleviato da una riduzione delle dimensioni del dispositivo. Il problema più grave era che con il silicio i processi chimici e metallurgici richiedevano sostanzialmente temperature più

elevate (ad esempio, il punto di fusione del silicio è di 1.415°C rispetto ai 937°C del germanio), aggravando il problema di ottenere purezza e perfezione dei cristalli. Proprio questa era la ragione principale per cui inizialmente era stato preferito il germanio per le applicazioni a transistor. In questo senso, seguendo la tecnica di purificazione del germanio ideata da B. Pfann nel 1951 e adattandola al silicio, Gordon Teal e E. Buehler nel 1952 mettevano le basi per un utilizzo quasi esclusivo del silicio, che sarebbe cominciato con il metodo introdotto nel 1955 da Czochralski.

L'uomo che ha aprì la strada per la tecnica di crescita dei cristalli fu proprio Teal. Non lavorava nel gruppo di Shockley, ma si manteneva aggiornato su quanto stesse accadendo. Gli fu chiesto all'occasione di fornire i cristalli per il *Solid State team*. Teal pensava che i transistor dovessero essere costruiti da un singolo cristallo, si opponeva a tagliare una fettina da un più grande lingotto di molti cristalli. I contorni fra tutti i piccoli cristalli causavano solchi che disperdevano la corrente e Teal aveva sentito parlare di come costruire un singolo grande cristallo che non avrebbe avuto tutte quelle dispersioni.

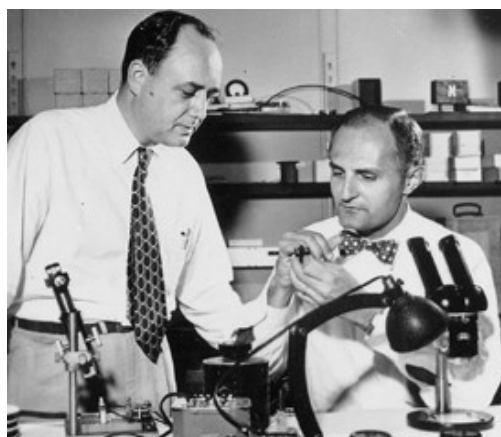


Figura 4.6: Gordon Teal (a sinistra) e Morgan Sparks mentre studiano le proprietà del germanio

Il metodo consisteva nel prendere un seme di cristallo molto piccolo e immergerlo nel germanio fuso. Questo allora veniva estratto così lentamente da permettere che si formasse un cristallo. Teal sapeva come farlo, ma nessuno sembrava essere, fino a quel momento, interessato. Un certo numero di istituzioni del tempo, inclusa la Bell, avevano la cattiva abitudine di non fidarsi delle tecniche che non fossero state inventate all'interno. Shockley all'epoca non pensava che questi singoli cristalli fossero utili. Jack Morton, a capo del gruppo di produzione del transistor, disse a Teal che avrebbe dovuto andare avanti con la ricerca, ma non diede molto supporto al suo campo di ricerca.

Fortunatamente, Teal continuò la ricerca, lavorando con l'ingegnere John Little. Tre mesi più tardi, nel marzo del 1949, Shockley dovette ammettere che aveva commesso un errore: la corrente che fluiva attraverso i semiconduttori di Teal poteva crescere fino a cento volte in più

rispetto ai vecchi cristalli tagliati.

La tecnologia di crescita dei cristalli era di buon livello e i cristalli ottenuti erano tutti di buona fattura, ma un *sandwich-transistor* aveva bisogno di un cristallo a sandwich. Gli strati esterni dovevano essere costituiti da un semiconduttore con un eccesso di elettroni (di tipo-n) oppure una carenza (di tipo-p), mentre lo strato interno doveva essere di tipo opposto. Sotto la direzione di Shockley, Teal e Morgan Sparks cominciarono ad aggiungere delle impurità nel processo di fusione mentre il cristallo veniva estratto. L'aggiunta di impurità al cristallo, nota come "drogaggio" del cristallo, permetteva di trasformare un semiconduttore intrinseco in un semiconduttore di tipo p o n.

Mentre il cristallo veniva estratto da una colata di germanio di tipo-n, aggiungevano rapidamente del gallio per trasformare il germanio in tipo-p. Appena lo strato di tipo-p si formava sul cristallo, avrebbero aggiunto dell'antimonio, per compensare il gallio e rendere la fusione nuovamente di tipo-n. Una volta portato a termine il processo, si aveva un unico sottile cristallo, formato come un sandwich.

Incidendo la superficie degli strati esterni, Sparks e Teal lasciarono una minuscola sporgenza al cristallo di tipo-p. A questa fissarono un sottile elettrodo, creando un circuito secondo come Shockley aveva concepito. Il 12 aprile 1950, esaminarono quanto avevano costruito. Senza dubbio, dal sandwich usciva più corrente di quella che veniva immessa. Era un amplificatore funzionante. Ma le sue caratteristiche non erano ancora molto buone. Questo transistor poteva amplificare i segnali elettrici, a condizione che non fossero particolarmente complicati. Se il segnale cambiava velocemente, come la voce su una linea telefonica, il transistor non ce la faceva a seguirlo e produceva disturbi in uscita. Il problema era nel mezzo del sandwich: era troppo facile per la corrente elettrica disperdersi mentre attraversava lo strato di tipo-p. Per risolvere il problema, lo strato doveva essere reso ancora più sottile.

Nel gennaio del 1951, Morgan Sparks riuscì a capire un modo per realizzare quello strato con uno spessore inferiore. Tirando il cristallo verso l'esterno più lentamente che mai, mentre la fusione veniva continuamente tenuta in rotazione, era riuscito ad ottenere lo strato centrale del sandwich più sottile di un foglio di carta.

Questo nuovo sandwich migliorato fece sperare in bene tutti i ricercatori. Questi non erano

ancora riusciti a superare i limiti del transistor a contatto puntiforme di maneggiare segnali oscillanti in modo estremamente rapido, ma da un altro punto di vista il loro dispositivo era superiore. Era più efficiente, dato che richiedeva meno potenza per funzionare, e quindi silenzioso (in termini di rumore elettronico) permettendo di maneggiare segnali più deboli.

Nel luglio del 1951, la Bell tenne un'altra conferenza stampa: questa volta annunciava l'invenzione di un transistor a giunzione funzionante ed efficiente. Nell'Ottobre del medesimo anno la Western Electric iniziava la produzione dei primi transistor commerciali che trovavano applicazioni certamente nella radio ma anche come amplificatori per auricolari per sordi.

Nel 1954 invece la Texas Instruments annuncia l'inizio della produzione commerciale di transistor realizzati con il silicio.

Capitolo 5 - Il MOS: una nuova era

Con l'invenzione del MOSFET e lo sviluppo di nuove tecnologie di produzione dei transistor con un diverso utilizzo del silicio, si è aperta la strada all'integrazione di interi circuiti su un unico dispositivo, di fatto riducendo drasticamente dimensioni e consumi. Successivamente, la preferenza verso le tecnologie digitali, ha portato alla supremazia del MOSFET rispetto ad ogni altro tipo di transistor basato sul silicio. La ragione di tale successo è stato lo sviluppo della logica digitale CMOS, che vede nel MOSFET il costituente fondamentale. Il sostanziale vantaggio del dispositivo è il fatto che, idealmente, quando è spento non permette alla corrente di scorrere, e ciò si traduce nella riduzione della potenza dissipata. Oltre a fornire un considerevole risparmio energetico, previene il surriscaldamento del circuito, una delle principali problematiche dei circuiti integrati, soprattutto quando l'integrazione inizia ad essere elevata.

5.1 L'evoluzione dei FET

Il transistor a effetto di campo è stato inventato da Lilienfeld nel 1925, ma i primi dispositivi costruiti, i JFET, risalgono al 1952, quando fu tecnologicamente possibile realizzarli. Il FET più diffuso è il MOSFET, introdotto da Kahng nel 1960. Insieme al transistor a giunzione bipolare, il FET è il transistor più diffuso in elettronica: a differenza del BJT esso presenta il vantaggio di avere il terminale gate di controllo isolato, nel quale non passa alcuna corrente; mentre ha lo svantaggio di non essere in grado di offrire molta corrente in uscita. In genere i circuiti con transistor FET hanno infatti una alta impedenza d'uscita, erogando quindi correnti molto deboli.

Cronologicamente, i progressi del MOS-FET possono essere divisi in tre fasi : la fase di scoperta dell'effetto-campo durante i primi trent'anni, quindi 1928-1958, la fase dello sviluppo tecnologico, con l'invenzione di una nuova struttura del dispositivo, collocata nei dieci anni seguenti, 1959-1968, e la fase di produzione di transistor MOS integrati e di circuiti integrati, a partire dal 1968 fino ad arrivare al giorno d'oggi. La prima fase inizia con i brevetti ottenuti da Lilienfeld negli anni 1926-1928, anche se la loro comprensione arriva solo intorno al 1947, nei Bell Laboratories da parte di Bardeen, Brattain e Shockley, quando la fisica di base del

transistor è stata chiaramente compresa ed applicata alle strutture di nuovi dispositivi. Atalla, Tannenbaum e Scheibner sono i protagonisti della seconda fase, completando con successo il progetto iniziato ai Laboratory Bell nel 1959, progetto che aveva l'obiettivo specifico di trovare un metodo per stabilizzare la superficie del silicio cresciuto termicamente con il diossido di silicio. Ed infine, Noyce e Moore, i quali hanno dato il via alla terza fase nel 1968, inventando per primi il concetto di circuito integrato monolitico nel 1960 e successivamente creando una società di produzione di circuiti integrati di MOS al silicio, l'Intel, nel 1968.

5.1.1 Gli esperimenti

Dopo i brevetti di Lilienfeld (1926-1928) ed Heil (1935), l'ondata successiva di invenzioni, è iniziata con Shockley nel 1939, quando, nei Bell Telephone Labs, dopo tre anni di tentativi per realizzare un amplificatore a stato solido, gli è stato chiesto di collaborare con Brattain per lo sviluppo di un raddrizzatore all'ossido di rame. Il loro lavoro è stato interrotto dalla II Guerra Mondiale, anche se Shockley propose due prototipi di transistor già nel 1939, prima di partire a causa del conflitto. Il primo era il transistor analogico formato da una griglia di fili di rame ossidato con schermo incassato in un semiconduttore di cristallo ad alogenuri alcalini, che era stato proposto e realizzato in precedenza da Hilsch e Pohl, e aveva una frequenza di taglio di circa 1 Hz, a causa della sua dimensione di circa 1 cm . Il secondo dispositivo era il MESFET, la cui progettazione non è stata influenzata dal precedente lavoro di Lilienfeld, certificato nel brevetto del 1926, poiché non era stata riconosciuto il significato di quest'ultimo. Le innovazioni ricominciarono dopo la guerra quando Shockley tornò ai Bell Labs, a metà del 1945. Nello stesso anno arrivò anche Bardeen, il quale intraprese uno studio di base sugli stati di superficie (*surface states*) di alcuni semiconduttori, dopo che Shockley gli mostrò i risultati sperimentali ottenuti da Pearson sulla bassissima modulazione di conducibilità di film di silicio e germanio nei loro esperimenti a effetto di campo.

Sia prima che dopo la guerra, Shockley aveva studiato e analizzato possibili strutture ad effetto-campo e avevano concluso che l'effetto doveva portare ad una amplificazione. Sembrava teoricamente possibile, ed un conferma importante arrivò dalla sfida intrapresa dal gruppo di lavoro dei Bell Labs. Nel gennaio 1946, vennero prese due decisioni critiche. La prima è stata quella di focalizzare l'attenzione del gruppo su cristalli di silicio e germanio ed

ignorare altri più complessi materiali di uso frequente nelle indagini precedenti. Fu quasi unanimemente riconosciuto che il silicio e il germanio erano elementi stabili che assumevano prontamente lo stato cristallino, e quindi rappresentavano i migliori candidati per essere trasformati in singoli cristalli ad elevata purezza. La seconda decisione è stata quella di seguire il principio dell'effetto-campo come quello che assicurava maggiormente una possibile invenzione di un dispositivo utile.

Si arrivò così all'invenzione del transistor a contatto puntiforme, realizzato partendo dal principio dell'effetto-campo. Gli esperimenti in quello che viene ricordato come “il mese dei miracoli” da parte di Brattain e Bardeen portarono alla realizzazione del primo dispositivo funzionante sulle teorie di Shockley, dopo i tanti tentativi falliti di quest'ultimo.

5.2 Dal JFET al MOSFET

Gli stati di superficie (*surface states*) negli esperimenti sul punto di contatto e in quelli senza successo sulla modulazione di conducibilità hanno ostacolato la riproducibilità dei dispositivi. Shockley ha realizzato la teoria dietro al transistor a giunzione bipolare (BJT) nel 1949, che dipendeva unicamente dall'iniezione di cariche minoritarie, e il transistor a giunzione di gate ad effetto-campo (JGFET) nel 1952. Entrambi questi transistor hanno, nella loro struttura, regioni elettricamente attive distanti dalla superficie. I due fenomeni notati e descritti per primi da Bardeen, Brattain e Shockley durante il 1947-1951, ovvero il canale d'inversione di superficie e la ricombinazione di superficie, sono i fattori fondamentali del degrado delle caratteristiche del transistor. La temporanea variazione della densità di carica dell'ossido cambiava la dimensione del canale di superficie, perché indotto o modulato dalla carica dell'ossido, carica che a sua volta, variando, modificava anche il tasso di ricombinazione degli elettroni e delle lacune negli stati superficiali. Lo strato superficiale di inversione di tipo-n su silicio di tipo-p e quello di inversione di tipo-p su germanio di tipo-n sono stati la ragione principale del buon funzionamento del transistor a contatto puntiforme ad effetto-campo inventato da Bardeen e Brattain nel 1947, i quali notarono anche la forte influenza del canale di inversione sulla caratteristica corrente-tensione. Questa influenza è stata ulteriormente dimostrata da Walter L. Brown nel 1953 che arrivò ad ottenere prove sperimentali di conduzione in un canale di inversione superficiale di tipo-n attraverso la

superficie di uno strato base di germanio di tipo-p in un transistor bipolare n-p-n. Le sue conclusioni furono inequivocabili nonostante le condizioni altamente instabili della superficie nei suoi esperimenti. Tale instabilità era dovuta all'assenza di un elettrodo di gate ed il canale veniva così indotto dalla carica di superficie dal gas ambiente. Ian M. Ross fu il primo a descrivere le moderne giunzioni p-n o la struttura del MOSFET ad arricchimento, nel 1957, conseguendo un brevetto utilizzando le osservazioni di Brown. Invece che dipendere dalle condizioni ambientali per il controllo della conduttanza del canale, come nell'esperimento di Brown, Ross mise un cristallo ferroelettrico sulla superficie di uno strato base di tipo-p del transistor n-p-n, cristallo che ha poi ricoperto con una pasta d'argento, realizzando di fatto l'elettrodo di gate. Ha poi applicato una tensione all'elettrodo per controllare la polarizzazione del materiale ferroelettrico e la conduttanza del canale di tipo-n, che si estendeva dal collettore all'emettitore.

Ross aveva inventato il suo transistor, con una struttura ancora moderna: due giunzioni raddrizzatrici ciascuna delle quali aveva un'estremità che finiva sul canale di inversione, struttura che ricordava quella pensata da Heil nel 1935, senza conoscere il principio di inversione di superficie. La versione moderna del MOSFET utilizza un film di ossido cresciuto termicamente al posto del film ferroelettrico per l'isolante di gate. Tra il 1950 ed il 1956 ci furono una serie di esperimenti nei vari laboratori su nuovi possibili metodi di fabbricazione dei transistor. Questi hanno contribuito significativamente, alcuni in modo diretto altri in modo indiretto, alla realizzazione del transistor MOS al silicio e dei circuiti integrati, passando per l'invenzione del primo BJT "moderno", prodotto da Teal, Spark, e Buehler nel 1951, e del primo JGFET, realizzato da Dacey e Ross nel 1953.

Proprio in quel periodo, il fisico M. M. Atalla era a capo di un gruppo presso i Bell Labs, composto da Ernesto Labate e Dawson Kahng, con la collaborazione di Tannenbaum e Scheibner, che si concentrava sullo studio delle proprietà di superficie del silicio in presenza di uno strato di diossido di silicio. Questi specularono sul fatto che crescere uno strato di ossido in circostanze controllate sulla superficie di uno strato di silicio accuratamente pulito poteva portare ad una ridotta densità degli stati sulla superficie del silicio. Nel 1959 confermarono che la presenza di uno strato di ossido poteva ridurre la densità degli stati superficiali a un livello tale che era possibile osservare un effetto-campo. Tuttavia, essi hanno

avuto difficoltà nell'acquisire il controllo sufficiente del processo per ottenere dei risultati riproducibili. In ogni caso, il concetto che uno strato di ossido poteva fornire una soluzione al problema di affidabilità era un grande passo in avanti.

Il loro metodo di esplorare gli stati di superficie implicava l'applicazione di una tensione ad un contatto di metallo sovrapposto ad uno strato di ossido cresciuto sul silicio di superficie. La densità degli stati in superficie di silicio era sufficientemente bassa che erano in grado di creare uno strato di inversione nel silicio sottostante. Questa è stata la prima operazione di un transistor all'ossido di metallo-semiconduttore ad effetto-campo (MOSFET), e si comportava proprio come la teoria voleva. Era stato inventato il moderno MOSFET.

L'evoluzione del MOSFET a canale di inversione è illustrata nelle figure 5.1 e 5.2, utilizzando disegni tratti da alcuni dei vari brevetti e articoli appena citati. In 5.1(a) è rappresentato il MOSFET a singola giunzione proposto da Lilienfeld nel suo secondo brevetto del 1928. In 5.1(b) compare invece il MOSFET con doppia giunzione e superficie di inversione inventato da Heil nel brevetto del 1935. Segue 5.1(c), il FET di Bardeen, in cui compare l'elettrodo di gate isolato; il primo dispositivo che ha registrato un guadagno di potenza in un amplificatore a stato solido. In 5.2(d) ad essere riportato è il diodo a giunzione p-n con un gate isolato di Shockley, che rappresenta un MOSFET con canale di inversione, senza il Source (oppure Drain). La figura 5.2(e) è la struttura di Brown a due giunzioni senza gate, utilizzata nei suoi esperimenti sul canale di superficie. La 5.2(f) mostra il MOSFET a canale di inversione di Ross che utilizza un gate ferroelettrico isolato. In fine 5.2(g), il moderno MOSFET a canale di inversione.

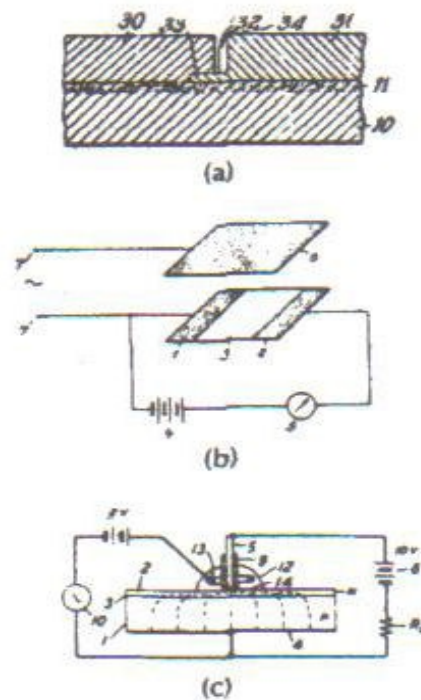


Figura 5.1: Evoluzione del MOSFET. (a) il MOSFET proposto da Lilienfeld, 1928; (b) il MOSFET inventato da Heil nel 1935; (c) il FET di Bardeen, 1948.

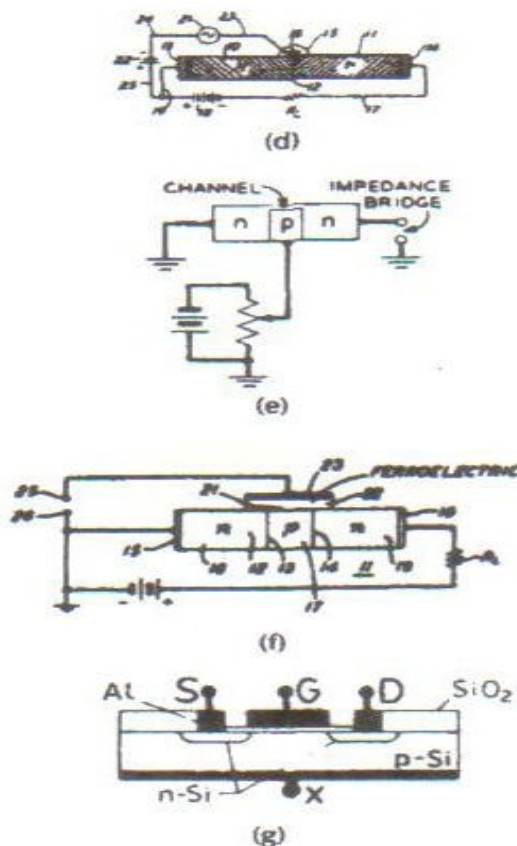


Figura 5.2: Evoluzione del MOSFET. (d) la versione del MOSFET di Shockley; (e) la struttura di Brown a due giunzioni senza un Gate; (f) il MOSFET a canale di inversione di Ross; (g) il moderno MOSFET.

È evidente che l'ordine cronologico della sequenza riportata in queste figure dimostra come le nuove idee e le innovazioni possono evolvere direttamente o indirettamente da conoscenze precedenti.

Tornando al lavoro che ha portato all'invenzione del moderno MOSFET, con il principale contributo di Atalla e D. Kahng, i risultati degli esperimenti vennero pubblicati durante la stessa conferenza in cui il transistor venne descritto. Tuttavia, in quegli anni, le prestazioni dei dispositivi MOS non potevano ancora competere con i dispositivi bipolari. Il problema principale era una alta tensione di soglia. Solo col lavoro e tempo che si è capito che era causata dall'alto potenziale di contatto dell'alluminio che veniva usato

per realizzare il gate (problema che è stato alla fine risolto con l'uso di silicio). Così, il concetto di effetto-campo ebbe ancora una volta il suo momento di gloria per poi ritornare nell'oscurità.

La svolta definitiva nella soluzione del problema di affidabilità è venuta con una invenzione fatta da J. A. Hoerni alla Fairchild tra il 1957 e l'inizio del 1958. La sua idea in seguito venne tradotta in pratica e pubblicata nel 1960. Hoerni proponeva che, nel corso della fabbricazione dei transistor di silicio per diffusione, lo strato di biossido di silicio che si utilizzava come maschera di diffusione venisse sistemato durante il processo stesso. Le giunzioni così intersecavano la superficie di silicio sotto lo strato di ossido. Hoerni sosteneva infatti che l'ossido poteva proteggere le aree di giunzione da una contaminazione. In seguito venne

accertato che tali giunzioni avevano caratteristiche accettabili, senza subire ulteriori trattamenti. Questo era un risultato sorprendente, soprattutto per coloro che credevano che l'ossido dovesse essere meticolosamente coltivato in condizioni di pulizia.

5.3 Il transistor planare

Nei suoi lavori del 1960, Hoerni descriveva un nuovo modo di concepire il dispositivo, inventando il transistor planare. In quel concetto, sia la regione di base che quella dell'emettitore venivano diffuse attraverso una finestra in una maschera di diossido di silicio in modo tale che entrambe le giunzioni di collettore ed emettitore finissero sulla superficie. Gli ossidi di mascheramento venivano depositati sul posto e fornivano la protezione necessaria alla superficie in silicio. Anche il contatto ohmico veniva realizzato durante il processo di fabbricazione, per entrambe le regioni di base ed emettitore, utilizzando lo stesso metodo. Il metallo usato per tutti i contatti era l'alluminio, che, come precedentemente avevano dimostrato Moore e R. N. Noyce, permetteva di realizzare un buon contatto per entrambi i tipi di silicio, tipo-p o tipo-n. Moore aveva anche dimostrato che l'alluminio poteva essere esteso fin sopra l'ossido per formare una grande pista che avrebbe reso più semplici le interconnessioni.

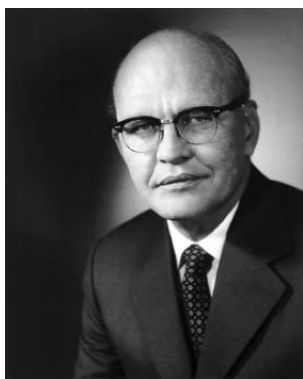
Di lì a poco, il processo di crescita epitassiale venne aggiunto al metodo per realizzare un transistor planare, minimizzando la resistenza del collettore. Tutti gli sviluppi chiave ed i problemi ingegneristici vennero così risolti grazie ad una soluzione elegante. Ormai c'era una solida base per la fabbricazione a lungo termine di dispositivi a semiconduttore. Il silicio, il semiconduttore scelto, poteva essere prodotto con la perfezione e la purezza cristallina più che adeguate al compito. Le dimensioni critiche in tutti e tre le direzioni potevano, se necessario, essere controllate fino ad una frazione di un micrometro. I contatti elettrici potevano essere realizzati con un unico metallo e senza una necessità di precisione microscopica. E cosa più importante, i dispositivi risultanti, alla fine, erano affidabili; inoltre promettevano un'alta resa e un basso costo unitario.

Circa 13 anni dopo la sua invenzione, il transistor aveva finalmente una solida base ingegneristica. Ciò costituiva l'elemento essenziale per quello che è stato il successivo passo

da gigante, il circuito integrato (IC), inventato nel 1958 da J. S. Kilby alla Texas Instruments, parallelamente a quanto stava sviluppando Noyce, in quel periodo alla Fairchild.

5.4 Il circuito integrato

Come accadde con molte invenzioni, due uomini ebbero l'idea del circuito integrato quasi allo stesso momento. I transistor erano diventati comuni in tutto, dalle radio ai telefoni, ai primi computer, e i grossi fornitori desideravano qualcosa di ancora migliore. Sicuramente i transistor erano più piccoli delle valvole elettroniche, ma per gli sviluppi di alcune realizzazioni elettroniche con prestazioni elevate, non erano abbastanza piccoli.



*Figura 5.3: Jack St. Clair
Kilby, 1923-2005*

C'era tuttavia un limite su quanto piccolo potesse essere un singolo transistor, poiché dopo la sua realizzazione, questo doveva necessariamente essere collegato tramite fili di connessione al resto dell'elettronica che componeva un circuito. I transistor erano già al limite di quanto, mani ferme e pinzette molto piccole, avrebbero potuto maneggiare. Così, gli scienziati cercarono di fare un circuito intero contenente i transistor, i fili e tutto ciò che fosse stato necessario al suo funzionamento. Se avessero potuto generare un circuito in miniatura in un'unica soluzione, tutte le parti avrebbero potuto essere rese molto più piccole.

Un giorno verso la fine di luglio del 1958, Jack Kilby stava seduto da solo alla Texas Instruments. Era stato assunto soltanto un paio di mesi prima e non aveva potuto godere delle ferie dato che non ne aveva ancora maturate. Aveva avuto parecchio tempo per pensare, ed ebbe la brillante idea che tutte le parti di un circuito, non solo il transistor, avessero potuto essere realizzate in germanio. A quei tempi, nessuno costruiva condensatori o resistori dai semiconduttori. Se ciò fosse stato possibile allora l'intero circuito avrebbe potuto essere sviluppato su un singolo cristallo, rendendolo più piccolo e molto più facile da produrre. Al capo di Kilby piacque l'idea e gli disse di lavorarci su. Il 12 settembre, Kilby aveva sviluppato un modello funzionante: mostrò un pezzo di germanio (che comprendeva un transistor, tre resistori ed un condensatore) con un oscilloscopio attaccato, premette uno switch, e

l'oscilloscopio mostrò un'onda sinusoidale, provando che il suo circuito integrato funzionava. Un brevetto per un "Circuito solido fatto di germanio", il primo circuito integrato, fu poi rilasciato il 6 febbraio 1959. Il dispositivo, del formato di una punta di matita, che fu mostrato per la prima volta al pubblico in marzo.

Ma in California, un altro uomo aveva avuto una idea simile. Nel gennaio del 1959, Robert Noyce stava lavorando in un'azienda dedicata alla costruzione dei transistor, nata da otto uomini, per lo più fisici e chimici, che lasciarono tutti insieme nel 1957 la Shockley Semiconductor per divergenze proprio con il fondatore di quest'ultima, Shockley. Gli otto erano Julius Blank, Victor Grinich, Jean Hoerni, Gene Kleiner, Jay Last, Gordon Moore, Robert Noyce, and Sheldon Roberts. Volevano lavorare nel modo che essi desideravano, e non come decretato da Shockley, e così nacque la Fairchild Semiconductor.

Noyce aveva realizzato che un circuito intero poteva essere fatto su un singolo circuito integrato. Mentre Kilby aveva risolto in dettaglio come fare i diversi componenti, il pensiero di Noyce andava in un senso di maggiore interesse: come collegare le parti. La primavera seguente, la Fairchild cominciò a costruire quelli che

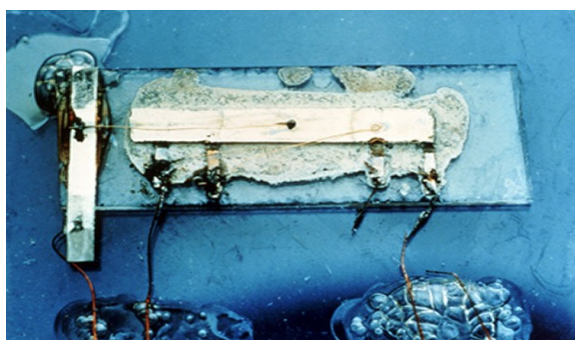


Figura 5.4: Il primo circuito integrato, realizzato da Kilby, 1958

chiamò "circuiti unitari" ed inoltre fece domanda per un brevetto sull'idea. Sapendo che la Texas Instruments aveva già archiviato un brevetto su qualcosa di simile, la Fairchild aveva si preoccupò di scrivere un rapporto altamente dettagliata, sperando che non fosse considerato simile al dispositivo della Texas. Tutti quei dettagli ebbero una ricompensa. Il 25 aprile 1961, l'ufficio brevetti assegnò il brevetto per un circuito integrato a Robert Noyce. Oggi, però viene riconosciuto ad entrambi gli uomini di aver concepito l'idea, indipendentemente l'uno dall'altro. Il progetto di Noyce era comunque un perfezionamento di quello di Kilby e consisteva in un processo di diffusione planare a partire dal silicio monocristallino mediante processi fotolitografici, ed inoltre realizzò il circuito integrato usando, però, il silicio al posto del germanio e risolvendo così alcuni problemi che questo materiale portava con sé.

5.5 L'integrazione su larga scala

Mentre Shockley guidava la sua azienda verso il progetto che lui aveva in mente, otto membri chiave della sua squadra, tra cui Robert Noyce e Gordon Moore, diedero le dimissioni accettando un'offerta della Fairchild Semiconductors che in quel periodo si stava concentrando sullo sviluppo del *mesa transistor*, ossia un transistor realizzato utilizzando tecniche di diffusione. In parallelo, Jack Kilby alla Texas Instruments nel luglio 1958, aveva formulato l'idea di mettere resistenze, condensatori, transistor e diodi su una singola fetta di silicio, e in agosto riuscì ad ottenere una versione semplificata del suo circuito costruito utilizzando *wire bonds* per le interconnessioni.



Figura 5.5: Robert Noyce,
1927-1990

Nel gennaio 1959, Noyce aveva già sviluppato un'altra versione della stessa idea. A partire dallo sviluppo del processo planare (ideato da J. Hoerni alla Fairchild), Noyce decise di focalizzare le sue attenzioni sul problema delle interconnessioni. La conseguenza fu l'intuizione di utilizzare un metallo che fosse foto-sensibile e che poi potesse essere inciso con un processo chimico. Attraverso l'intuizione di entrambi Kilby e Noyce, il transistor aveva così dato vita al circuito integrato. Inizialmente l'IC (*Integrated Circuit*) era visto come una tecnologia troppo costosa per applicazioni diverse da quelle che miravano alla massima miniaturizzazione, anche perché le previsioni stimavano una bassa resa di produzione. Di conseguenza anche l'affidabilità diventava una preoccupazione. Tuttavia nel 1959, un team con a capo M. Atalla presso i Bell Labs dimostrò che gli ossidi cresciuti in circostanze pulite e controllate, permetteva di ottenere stati di superficie ridotti, e nel 1960 fu Hoerni a dimostrare che mettendo semplicemente una maschera di diffusione di ossido direttamente nel processo di produzione, portava miglioramenti sorprendenti in termini di affidabilità, senza dover eseguire ulteriori trattamenti.

Un altro progresso fondamentale si è avuto con Dalton, che nel 1966 mostrò come uno ricopertura di nitruro di silicio poteva fornire una protezione contro ioni alcalini, traducibile come un abbattimento dei costi di produzione, che comprendevano anche gli imballaggi.

Già nel 1961 l'industria dei semiconduttori aveva superato il miliardo di dollari di fatturato. Nel frattempo il lavoro di Atalla sul controllo degli stati di superficie ha portato alla realizzazione del primo transistor MOS (Atalla e Kahng, 1960), ma ci sono voluti alcuni anni perché il dispositivo fosse in grado di competere con i transistor bipolari.

5.5.1 Un po' di made in Italy

Alle porte degli anni settanta il MOS era pronto per diventare l'indiscusso protagonista dell'elettronica. In questo scenario, un ruolo fondamentale in termini di progresso ed innovazione va attribuita all'italiano Federico Faggin, laureato in fisica nel 1965 presso l'Università di Padova, dove venne subito nominato assistente incaricato.

Assunto due anni dopo dalla SGS-Fairchild con sede ad Agrate Brianza, sviluppò nel suo primo anno di lavoro la prima tecnologia di processo per la fabbricazione di circuiti integrati MOS e progettò i primi due circuiti integrati commerciali MOS. Il suo lavoro non passò di certo inosservato. Ricevette l'offerta di andare a lavorare alla Fairchild Semiconductor in California, che ovviamente accettò. Qui si dedicò allo sviluppo dell'originale MOS



Figura 5.6: Federico Faggin

Silicon Gate Technology, la prima tecnologia di processo per la fabbricazione di circuiti integrati con gate auto-allineante. Progettò e produsse anche il primo circuito integrato commerciale che usasse la *Silicon Gate Technology*, il Fairchild 3708, un multiplexer analogico a 8 canali con *decoding logic*. Sviluppò anche il processo di *silicon gate a canale-n* e lavorò a processi avanzati di *CMOS* e *BiCMOS* con *silicon gate*. La *Silicon Gate Technology* nel 1970 rese possibile la *large scale integration* (LSI) e la *very large scale integration* (VLSI), permettendo per la prima volta la fabbricazione di circuiti integrati MOS su larga scala, ad alta velocità e a basso costo.

A vent'anni dall'invenzione del primo transistor, le cose erano cambiate profondamente. Inizialmente ogni chip conteneva un solo transistor, in seguito con lo sviluppo tecnologico in un chip furono integrati sempre più transistor aumentando la cosiddetta scala di integrazione. Con i miglioramenti tecnologici il numero aumentò vertiginosamente. La prima generazione

di computer utilizzava valvole termoioniche. In seguito si iniziarono ad utilizzare i primi transistor e in seguito i chip con più transistor. La prima generazione era la generazione *Small-Scale Integration* (SSI) che integrava un ridotto numero di componenti come diodi, resistenze, capacità e ovviamente transistor in un singolo chip. Questa tecnologia consentiva di realizzare porte logiche. In seguito la tecnologia *Large-Scale Integration* (LSI) permise la realizzazione di molte porte logiche in un singolo chip, per arrivare alla tecnologia VLSI, che permetteva un'integrazione almeno dieci volte maggiore della LSI.

<i>ERA</i>	<i>DATA</i>	<i>COMPLESSITÀ</i>
Single transistor	1959	Meno di 1
Unit logic (one gate)	1960	1
Multi-function	1962	2 - 4
Complex function	1964	5 - 20
Medium Scale Integration (MSI)	1967	20 - 200
Large Scale Integration (LSI)	1972	200 - 2000
Very Large Scale Integration (VLSI)	1978	2000 - 20000
Ultra Large Scale Integration (ULSI)	1989	20000 - ?

Tabella 5.1: L'evoluzione delle scale di integrazione

L'industria dell'elettronica ha raggiunto una crescita fenomenale nel corso di quei decenni, a causa soprattutto dei rapidi progressi nelle tecnologie di integrazione, in particolare con l'avvento della VLSI. Il numero di applicazioni di circuiti integrati in *high-performance computing*, nelle telecomunicazioni e nell'elettronica era in costante aumento, e ad un ritmo molto veloce. In genere, la potenza computazionale richiesta (o, in altre parole, l'intelligenza) di queste applicazioni era la forza trainante per lo sviluppo rapido di questo settore. Una delle caratteristiche più importanti dei servizi di informazione era il loro crescente bisogno di potenza di elaborazione e larghezza di banda molto elevata. L'altra caratteristica importante era che i servizi d'informazione tendevano a diventare sempre più personalizzati (rispetto a servizi collettivi quali la radiodiffusione), spingendo i dispositivi verso una maggiore flessibilità / mobilità.

5.5.2 La legge di Moore

Il livello di integrazione, misurata dal numero di porte logiche in un chip monolitico, è tutt'ora in costante aumento, soprattutto a causa dei rapidi progressi nella trasformazione della tecnologia di interconnessione, che ha portato a varcare la soglia della ULSI.

L'integrazione su larga scala rese anche possibile, due anni dopo l'intuizione di Faggin, la creazione di memorie a semiconduttori e del primo microprocessore. Oggi più del 90% di tutti i circuiti integrati prodotti nel mondo usa la *silicon gate technology*. Proprio Faggin, ormai stabilitosi negli Stati Uniti, nel 1970 passò alla Intel, che sarebbe poi divenuta un gigante dell'informatica, e venne assunto per sviluppare e dirigere il progetto del primo microprocessore, l'Intel 4004 (inizialmente denominato MCS-4), contribuendo con idee fondamentali alla sua realizzazione. La metodologia *random logic design in silicon gate*, creata da Faggin per sviluppare il 4004, fu poi usata per progettare le prime generazioni di microprocessori della Intel. Il 4004 fu il primo microprocessore al mondo che integrava in un singolo chip una potenza di calcolo superiore a quella dello storico *ENIAC*, il primo calcolatore elettronico al mondo.

Con l'avvento dei microprocessori e dei dispositivi di memoria a semiconduttori nei primi anni 1970, il dibattito ha cominciato ad essere spinto in favore quasi esclusivo dei transistor MOS. L'Intel 2115, una SRAM da 1k a soli NMOS che era *pin-compatibile* con il Fairchild bipolare 93415, dimostrava che i dispositivi MOS scalati potevano competere in termini di prestazioni. Il più semplice e più piccolo MOSFET era

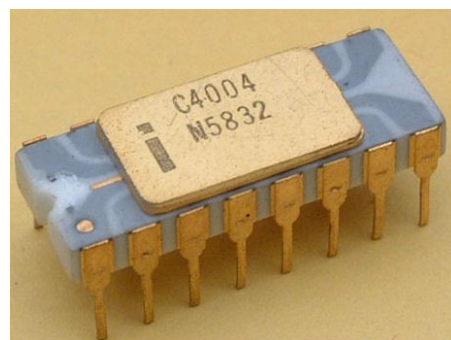


Figura 5.7: il primo microprocessore,
l'Intel 4004

più facile da fabbricare grazie a regole di progettazione all'avanguardia e più dispositivi MOS potevano quindi essere sistemati in una chip di dimensioni predefinite. La DRAM, a partire dai primi anni 1970, ha guidato il *processo di scaling* delle dimensioni dei transistor, legato principalmente alla litografia più fine, i miglioramenti nei processi tecnologici (ad esempio, incisione a secco), e una migliore comprensione della fisica del dispositivo.

Proprio in materia di *scaling* si era pronunciato nel 1965 Gordon Moore, che in quel periodo

era alla Fairchild di Palo Alto che poi lasciò, insieme ad un suo collega Robert Noyce, per fondare un'altra società di semiconduttori, l'Intel appunto. Fece un'osservazione sullo *scaling* dei MOS e l'aumento dei livelli di integrazione che è diventata nota come *Legge di Moore*.

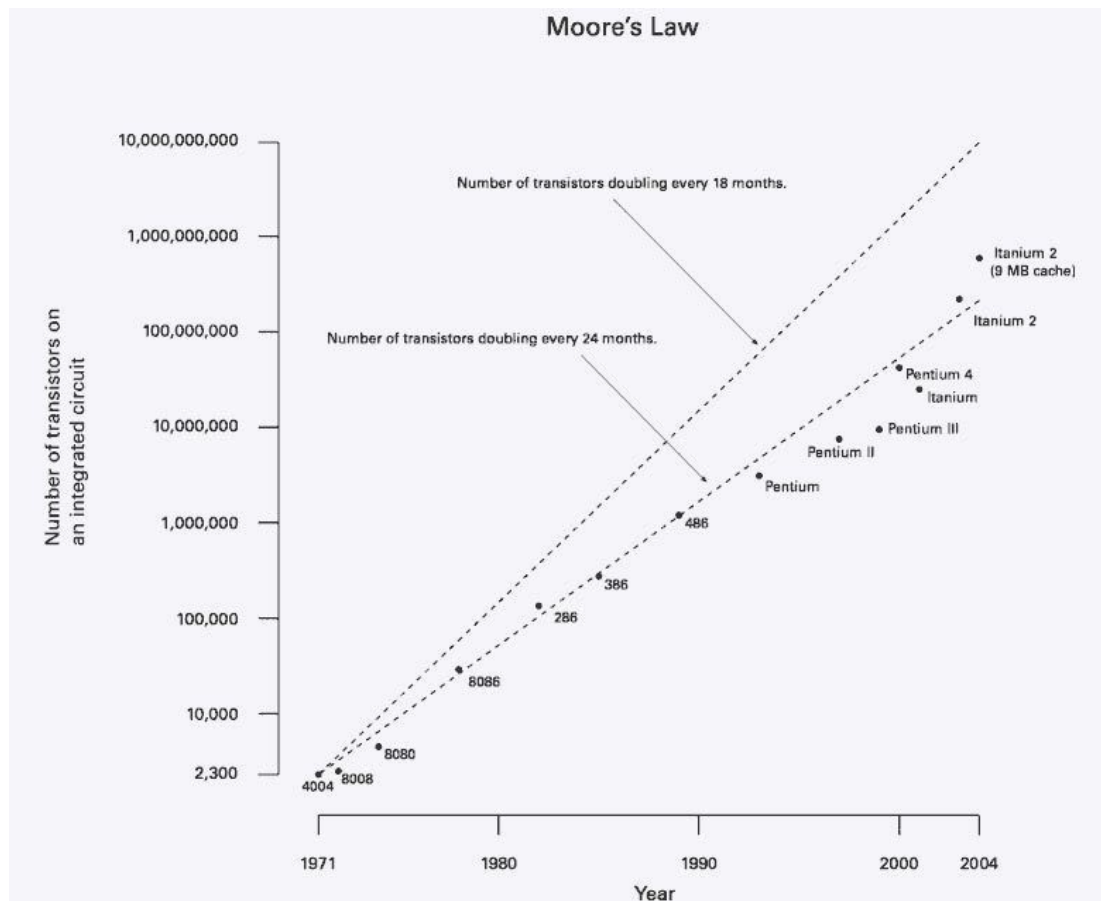


Figura 5.8: Legge di Moore, 1965

Riportati su una scala semi-logaritmica, il numero di transistor su un chip di silicio in funzione della data di disponibilità dava una linea retta, che indicava un raddoppio della capacità ogni anno. Qualche anno dopo il tasso è diventato più vicino ad un raddoppio ogni diciotto mesi. Uno dei più importanti cambiamenti nella tecnologia che ha mantenuto l'industria sulla curva di Moore è stato la diffusa adozione dei MOS complementari o CMOS nei primi anni del 1980, ed ora rappresentano il 75% del totale dei ricavi del mercato IC. I dispositivi CMOS richiedono un'elaborazione più complessa, data la necessità di avere entrambi i transistor NMOS e PMOS nel substrato stesso, ma quasi non consumano potenza in stand-by.

La legge di Moore nonostante abbia passato più di quarant'anni di storia della tecnologia è ancora attuale. Tuttavia inizia ad essere messa in discussione, sia per i sopraggiunti limiti fisici della tecnologia per cui era prevista, sia per l'entrata in scena di nuove possibili tecnologie, come la SET, *Single Electron Transistor*, che si spingono verso soglie che nel 1948 Shockley, Brattain e Bardeen non potevano nemmeno immaginare.

Bibliografia

- M. Guarnieri, Fatti e protagonisti dell'elettromagnetismo – Breve compendio cronobiografico delle scienze e tecnologie elettromagnetiche, Editore Aracne, Roma, 2005
- Jacob Millman, Christos C. Halkias - Dispositivi e circuiti elettronici - 1975, Boringhieri
- Microsoft Encarta Enciclopedia Plus 2002, 1993-2001, Microsoft Corporation
- Andrea Lacaita, Marco Sampietro - Circuiti elettronici - 1994, CittàStudi
- Michael Riordan, Lillian Hoddeson - Crystal Fire - 1997
- Carolyn Tajna - The Father of Silicon Valley - 1992
- William Shockley - "How we Built the Transistor" - New Scientist, dicembre 1972
- Tom Wolfe - "The Tinkerings of Robert Noyce: How the Sun Rose on the Silicon Valley" - Esquire, December 1983
- A History of Engineering and Science in the Bell System: Physical Sciences (1925-1980) - S.Millman Editor
- A. Frava – La rivoluzione elettronica – Editori Riuniti – Roma 1981
- M. Guzzi – Introduzione allo studio di semiconduttori e dispositivi a semiconduttore – CUSL – Milano 1987
- S.M. Sze – Fisica dei dispositivi a semiconduttore – Tamburini – Milano 1973
- R.S. Muller e T.I. Kamins – Dispositivi elettronici nei circuiti integrati – Boringhieri – Torino 1982
- G. Veronica – Tempo Elettronico – Uni Service 2006
- G. Filella - Elettronica digitale, sapere e saper fare – 2005
- J.M. Rabaey, A. Chandrakasan, B. Nikolic - Circuiti integrati digitali – Prentice Hall 2005

Siti web

- Texas Instruments (www.ti.com/corp/docs/company/history/tihistory.htm)
- Bell Laboratories (www.bell-labs.com/history)
- Lucent Technologies (www.lucent.com)
- Sony (www.sony.net/Fun/SH)
- American Telephone e Telegraph Company (AT&T) (www.att.com/history)
- Transistorzed (www.pbs.org/transistor)
- Wikipedia (<http://it.wikipedia.org>)
- <http://www.dichroic-cell.it>
- Sistema bibliotecario di ateneo, Università di Padova
- Portale AIRE, Università di Padova
- <http://www.computerhistory.org>
- <http://www.chem.ch.huji.ac.il/history.htm>

